

TNO-rapport
TNO-MEP – R 99/490

TNO Milieu, Energie
en Procesinnovatie

TNO-MEP
Business Park E.T.V.
Laan van Westenenk 501
Postbus 342
7300 AH Apeldoorn

Telefoon: 055 549 34 93
Fax: 055 541 98 37
Internet: www.mep.tno.nl

Energiebronnen voor Soldier Modernisation Programme Systemen

WP1: Globale specificaties

WP2: Inventarisatie energiebronnen

WP3: Globale selectie energiebronnen

Datum
december 1999

Auteur(s)
Ir. J.W. Raadschelders
Dr.ir. D. Schmal

Projectnummer
30255

TNO-DO opdrachtnummer
A99/KL/158

Trefwoorden
energieopslag, energieopwekking, draagbaar,
soldier modernisation programme

Rubricering
Vastgesteld door: aooi T. Jansen
Vastgesteld: 8 december 1999
Titel: ongerubriceerd
Management uittreksel: ongerubriceerd
Executive summary: ongerubriceerd
Samenvatting: ongerubriceerd
Rapporttekst: ongerubriceerd
Oplage: 26
Aantal bladzijden: 51
Aantal bijlagen: 4

Bestemd voor
Lt.kol. J. Meijer, programmaleider Soldier Modernisation
Programme
Afd. Beleidsontwikkeling Operationeel Beleid & Training
Directie Beleid en Planning
Koninklijke Landmacht
Postbus 3003
3800 DA Amersfoort

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar
gemaakt door middel van druk, foto-
kopie, microfilm of op welke andere
wijze dan ook zonder voorafgaande
toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
Algemene Voorwaarden voor onder-
zoeksopdrachten aan TNO, dan wel
de betreffende terzake tussen de
partijen gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het
TNO-rapport aan direct belang-
hebbenden is toegestaan.

© 1999 TNO

Het kwaliteitssysteem van TNO Milieu, Energie en
Procesinnovatie voldoet aan ISO 9001.

TNO Milieu, Energie en Procesinnovatie is een nationaal en
internationaal erkend kennis- en contractresearch instituut
voor bedrijfsleven en overheid op het gebied van duurzame
ontwikkeling en milieu- en energiegerichte procesinnovatie.

DISTRIBUTION STATEMENT A
Approved for Public Release
Distribution Unlimited

20000127 097



DTIC QUALITY INSPECTED 1

Op opdrachten aan TNO zijn van toepassing de Algemene
Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, zoals
gedeponeerd bij de Arrondissementsrechtbank en de
Kamer van Koophandel te 's-Gravenhage.

AQ F00-04-1014

Management Uittreksel

Titel	:	Energiebronnen voor Soldier Modernisation Programme Systemen WP1: Globale specificaties WP2: Inventarisatie energiebronnen WP3: Globale selectie energiebronnen
Auteurs	:	J.W. Raadschelders, D. Schmal
Datum	:	december 1999
Opdrachtnummer	:	A99/KL/158
TDCK nummer	:	TD99-0437
Rapport nummer	:	R99/490

In dit rapport wordt een eerste globale selectie gemaakt van energiebronnen die mogelijk toegepast zouden kunnen worden in de toekomstige gevechtssoldaat als systeem. In de huidige situatie bij de Koninklijke Landmacht (KL) is de gevechtssoldaat voorzien van verschillende elektronische hulpmiddelen. Doordat er door de KL een inkoopbeleid is gevoerd dat er op gebaseerd is voor elk subsysteem het, op dat moment, best beschikbare systeem aan te schaffen is er een verscheidenheid aan apparatuur in gebruik. Doordat elk apparaat als afzonderlijk systeem is ontworpen is ook elk apparaat voorzien van zijn eigen energiebron. Dit heeft geresulteerd in de situatie dat een soldaat een grote verscheidenheid aan batterijen met zich mee moet torsen, en vaak nog van elk soort één of meerdere reserve exemplaren. In de toekomst zullen nog meer elektronische systemen benodigd zijn waardoor de situatie verder kan verslechteren.

Om de huidige situatie te inventariseren en indien mogelijk te verbeteren is onderhavig project opgezet. In het project "Energiebronnen voor Soldier Modernisation Programme Systemen" is er vooralsnog voor gekozen om uit te gaan van één centrale energiebron die alle subsystemen van energie voorziet. Hiervoor zijn eerst in hoofdstuk 3 de globale specificaties voor de energiebron opgesteld (werkpakket 1). Dit is gebeurd op basis van gegevens vanuit de KL en met behulp van gegevens van het Amerikaanse leger. De voor dit project belangrijkste getal waarden staan in de tabel.

Systeem	Vermogen [W]	Gemiddeld* [W]	Totale energie in 24 uur [Wh]
Geïntegreerd Helm Systeem	0,25 - 5,8	2,8	67
Global Positioning System	0,6 - 1,8	1,0	24
Radio (ontvangen-zenden)	1,0 - 2,4	1,2	29
Warmte Beeld	0 - 5,5	2,5**	60
Zaklamp	0 - 1,0**	0,3**	7
Computer	1,5 - 15,0	8,3	200
Totaal	10 - 35	16	387
Wapen subsysteem	0 - 7,8	2,78	67

* Gemiddeld over 24 uur.

** De gegeven waarde is een aanname.

Uit deze globale specificaties volgt dat een mogelijke energiebron in staat moet zijn om gedurende 24 uur een vermogen te leveren van minimaal 10 W en maximaal 35 W. De totale energie-inhoud dient minimaal 400 Wh te zijn. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat het wapensubsysteem niet op de centrale energiebron is aangesloten. Dit vanwege praktische bezwaren tegen een vaste (kabel) verbinding tussen wapen en soldaat.

Wat betreft het energieverbruik van de systemen waar, bij de TNO-DO instituten, onderzoek naar gedaan wordt, is er nog weinig bekend. Duidelijk is dat er tot nu toe tijdens de ontwikkeling van deze systemen weinig gelet is op het energieverbruik.

In hoofdstuk 4 wordt een globaal overzicht gegeven van de energiebronnen en hun eigenschappen die mogelijk toegepast zouden kunnen worden in de toekomstige gevechtssoldaat als systeem (werkpakket 2). Hierbij is een onderverdeling gemaakt in vier verschillende soorten energiebronnen:

1. Systemen voor opslag van elektrische energie
 - niet-herlaadbare (primaire) batterijen
 - herlaadbare (secundaire) batterijen
 - condensatoren
 - vliegwielen
 - regeneratieve brandstofcellen
2. Systemen voor omzetting van brandstof in elektrische energie
 - Verbrandingsmotor/generator
 - Brandstofcellen
 - Microturbine/generator
 - Thermofotovoltaïsche generator

3. Door menskracht "aangedreven" systemen
 - Active tags
 - Permanente magneet en draadspoel
 - Bayliss Generator
4. Door externe krachten aangedreven systemen voor opwekking van elektrische energie
 - zonne-energie
 - windenergie
 - waterkracht

Van elk van deze soorten worden in hoofdstuk 4 globaal de beschikbare en de zich nog in de ontwikkelingsfase bevindende systemen met hun specifieke eigenschappen en voor- en nadelen behandeld.

Een overzicht van de ontwikkelingen op dit gebied bij het Amerikaanse leger is als bijlage A toegevoegd.

In hoofdstuk 5 wordt op basis van de globale specificaties en de eigenschappen van de verschillende energiebronnen een eerste selectie gemaakt van energiebronnen die mogelijk toegepast zouden kunnen worden (werkpakket 3). Hierbij is een onderverdeling gemaakt tussen systemen die de komende jaren leverbaar zijn en systemen die nu nog in ontwikkeling zijn en waarvan verwacht wordt dat het nog meer dan 5 jaar duurt voordat ze op grote schaal commercieel verkrijgbaar zullen zijn. De eerste globale selectie is gebaseerd op specifieke energie [Wh/kg]. Dit is gedaan omdat één van de belangrijkste punten voor de uitrusting van een gevechtssoldaat het gewicht van zijn uitrusting is.

Uit deze eerste selectie zijn voor de korte termijn batterijen als beste optie naar voren gekomen.

Voor niet herlaadbare batterijen is de lithium thionylchloride (Li / SOCl₂) batterij geselecteerd. De Al / lucht en de Zn / lucht batterij zijn niet geselecteerd omdat die niet in staat zijn om de gevraagde vermogens, bij de benodigde capaciteit, te leveren. De andere primaire batterijen hebben alle een specifieke energie die beduidend lager ligt dan die van de Li / SOCl₂ batterij.

Voor herlaadbare batterijen zijn de Li / ion en de NiMH geselecteerd. De NiMH batterij is ondanks de wat lagere specifieke energie nog geselecteerd omdat die een betere verkrijgbaarheid heeft dan de lithium systemen, die vaak nog specifiek aan een applicatie gebonden zijn en bovendien in een priller stadium van ontwikkeling zijn.

Voor de lange termijn is de Directe Methanol Brandstofcel (DMFC) als energie-opwekker geselecteerd. De waterstof gevoede brandstofcel is niet geselecteerd omdat de complicaties van opslag en distributie van waterstof op een gevechtsveld nog niet te overzien zijn. De door menskracht, zonne-, water- en wind- energie systemen worden momenteel niet als reële optie gezien voor de SMP toepassing.

Ze hebben of een te klein vermogen of zijn te afhankelijk van externe, niet beïnvloedbare, omstandigheden zoals het weer. De microturbine / generator combinatie is niet geselecteerd vanwege de aanwezigheid van bewegende delen en de daarbij horende kans op uitval. Vliegwielen en condensatoren vallen af vanwege hun lage specifieke energie. De thermofotovoltaïsche generator is voor zover bekend alleen nog in ontwikkeling voor toepassingen op grote schaal. Een nadere selectie maken dan hierboven genoemd is momenteel nog niet mogelijk wegens het ontbreken van gedetailleerde specificaties. Reden hiervoor is dat de ontwikkeling van apparatuur in het kader van SMP nog volop gaande is.

Executive Summary

Title : Energy sources for Soldier Modernisation Programme Systems
 WP1: Global specifications
 WP2: Inventarisation energy sources
 WP3: Global selection energy sources
 Authors : J.W. Raadschelders, D. Schmal
 Date : December 1999
 Contract number : A99/KL/158
 TDCK number : TD99-0437
 Report number : R99/490

In this report an overview is given of the energy sources and their properties which might be implemented in a future soldier system. The current Dutch soldier is equipped with several electronic systems. Due to the policy of the Royal Dutch Army of purchasing the, at that moment, best available systems a variety of systems from different manufacturers is in use at this moment. Because all these systems have been designed separately they are all equipped with their own energy supply. This has resulted in a situation where the soldier has to carry several different types of batteries, and often also one or two spare ones for each system. In the future more and more electronic equipment will be required, this can make the situation even worse.

The objective of this project "Energy sources for Soldier Modernisation Systems" is to improve this situation by investigating the possibility of utilising one centralised energy source which supplies the energy required for all the separate systems. In chapter 3 the general specifications for the energy source are given (work package 1). They are based on data from the Royal Netherlands Army and the US Army. The for this project important figures are given in the table below.

System	Power [W]	Average* [W]	total energy in 24 hours [Wh]
Integrated Helmet Assembly	0.25 - 5.8	2.8	67
Global Positioning System	0.6 - 1.8	1.0	24
Radio (receive-transmit)	1.0 - 2.4	1.2	29
Thermal sight	0 - 5.5	2.5**	60
Torch light	0 - 1.0**	0.3**	7
Computer	1.5 - 15.0	8.3	200
Total	10 - 35	16	387
Weapon subsystem	0 - 7.8	2.78	67

* Average over 24 hours.

** Given value is an approximation.

From these data it results that a potential energy source has to be able to generate a minimum of 10 W and a maximum of 35 W and to deliver a total of 400 Wh in 24 hours. These numbers are exclusive of the energy required for the weapon sub-system. Practical reasons prohibit a solid (cable) connection between weapon and soldier.

Little is yet known about the energy consumption of the systems currently under development at the TNO-Defence research institutes. It is clear that the energy consumption of future systems has so far not been a major point of consideration.

In chapter 4, a global overview is given of the possible energy sources which might be applied in the future soldier systems (work package 2). A subdivision has been made between four different energy sources:

1. Systems which store electrical energy
 - non-rechargeable (primary) batteries
 - rechargeable (secondary) batteries
 - capacitors
 - flywheel
 - reversible fuel cells
2. Systems which convert fuel into electrical energy
 - Combustion engines/generator
 - Fuel cells
 - Microturbine/generator
 - Thermophotovoltaic generator
3. Human powered systems
 - Active tags
 - Permanent magnet and wire coil
 - Bayliss Generator
4. Systems powered by external forces
 - solar power
 - wind power
 - water power

For these four the specific properties, advantages and disadvantages are treated of the available systems. Also the systems which are currently under development and expected to become available in reasonable time are mentioned. An overview of the developments for soldier modernisation in the United States, referred to as "The dismounted soldier" is given in Annex A.

In chapter 5 a first selection of energy sources which might be applied in the future soldier systems, based on the general specifications given in chapter 3 and the properties of the energy sources, has been made (work package 3). A subdivision has been made between the short term and long term options. Long term options are expected to become available for large scale utilisation only after more than 5 years from now. The first selection is based on the specific energy [Wh/kg] of

the energy sources, due to the fact that weight is one of the most important issues for the soldiers equipment.

From this first selection it has turned out that for the short term batteries are the most viable option.

For the non-rechargeable batteries the lithium thionylchloride (Li / SOCl₂) type are selected. The Al / air and the Zn / air batteries have not been selected because of their limited rate capability. The other non-rechargeable battery types all have significantly lower specific energies than the lithium types.

For the rechargeable types the Li-ion and the NiMH batteries are selected. The NiMH type has been selected, withstanding its somewhat lower specific energy, due to the fact that the lithium types are not readily available. The lithium types often have an application specific design and are also in an earlier stage of development.

For the long term application the Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) as energy generator is currently considered to be the best option. The Solid Polymer Fuel Cell with hydrogen as fuel has not been selected due to the yet unknown consequences of utilisation, production and transportation of hydrogen on a battle field. The human-powered systems, solar- wind- and water- energy are not considered viable options for application in the soldier-as-a-system due to their limited power output and their dependability on external, uncontrollable, conditions, such as the weather. The microturbine/ generator combination has not been selected because of the presence of moving parts, enlarging the change of system failure. Flywheel and super capacitors storage systems have not been selected due to their low specific energy. Thermophotovoltaic generators are only known to be under development for large scale applications and are not considered to become available for portable applications within the time-range of this study.

A more specific selection is momentarily not possible due to the lack of detailed specifications mentioned before.

Samenvatting

In dit rapport wordt een eerste globale selectie gemaakt van energiebronnen die mogelijk toegepast zouden kunnen worden in de toekomstige gevechtssoldaat als systeem.

Hiervoor zijn in hoofdstuk 3 de globale specificaties voor de energiebron opgesteld. Dit is gebeurd op basis van gegevens vanuit de KL en met behulp van gegevens van het Amerikaanse leger. Uit deze globale specificaties volgt dat een mogelijke energiebron in staat moet zijn om gedurende 24 uur een vermogen te leveren van minimaal 10 W en maximaal 35 W en een totale energie-inhoud dient te hebben van 400 Wh. Wat betreft het energieverbruik van de systemen, waar bij de TNO-DO instituten onderzoek naar gedaan wordt, is er nog weinig bekend. Duidelijk is dat er tot nu toe tijdens de ontwikkeling van deze systemen weinig gelet is op het energieverbruik.

In hoofdstuk 4 wordt een globaal overzicht gegeven van de energiebronnen en hun eigenschappen die mogelijk toegepast zouden kunnen worden in de toekomstige gevechtssoldaat als systeem. Hierbij is een onderverdeling gemaakt in vier verschillende soorten energiebronnen:

1. Systemen voor opslag van elektrische energie.
2. Systemen voor omzetting van brandstof in elektrische energie.
3. Door menskracht "aangedreven" systemen.
4. Door externe krachten aangedreven systemen

Van elk van deze soorten worden in hoofdstuk 4 globaal de beschikbare en de zich nog in de ontwikkelingsfase bevindende systemen met hun specifieke eigenschappen en voor- en nadelen behandeld.

Een overzicht van de ontwikkelingen op dit gebied bij het Amerikaanse leger is als bijlage A toegevoegd.

In hoofdstuk 5 wordt op basis van de globale specificaties en de eigenschappen van de verschillende energiebronnen een eerste selectie gemaakt van energiebronnen die mogelijk toegepast zouden kunnen worden. Hierbij is een onderverdeling gemaakt tussen systemen die op korte termijn leverbaar zijn en systemen die nu nog in ontwikkeling zijn en waarvan verwacht wordt dat het nog meer dan 5 jaar duurt voordat ze op grote schaal commercieel verkrijgbaar zullen zijn.

Uit deze eerste globale selectie zijn voor de korte termijn de batterijen als beste optie naar voren gekomen. Als niet herlaadbare batterijen is de Li / SOCl₂ batterij, en als herlaadbare batterijen zijn de Li / ion en de NiMH geselecteerd.

Voor de lange termijn is de Direct Methanol Brandstofcel (DMFC) als energieopwekker geselecteerd.

Summary

Title : Energy sources for Soldier Modernisation Programme Systems

WP1: Global specifications

WP2: Inventarisation energy sources

WP3: Global selection energy sources

In this report an overview is given of the energy sources and their properties which might be implemented in a future soldier system.

In chapter 3 the general specifications for the energy source are given. They are based on data from the Royal Netherlands Army and the US Army. From these data it results that a potential energy source has to be able to generate a minimum of 10 W and a maximum of 35 W and to deliver a total of 400 Wh in 24 hours. Little is yet known about the energy consumption of the systems currently under development at the TNO-Defence research institutes. It is clear that the energy-consumption of a future systems has not been a major point of consideration.

In chapter 4 a global overview is given of the possible energy sources which might be applied in the future soldier systems. A subdivision has been made between four different energy sources:

1. Systems which store electrical energy.
2. Systems which convert fuel into electrical energy.
3. Human powered systems.
4. Systems powered by external forces

For these four the specific properties, advantages and disadvantages of the available systems are treated. Also the systems which are currently under development and expected to become available in reasonable time are mentioned. An overview of the developments for soldier modernisation in the United States, referred to as "The dismounted soldier" is given in Annex A.

In chapter 5 a first selection of energy sources which might be applied in the future soldier systems, based on the general specifications given in chapter 3, has been made. A subdivision has been made between the short term and long term options. Long term options are expected to become available for large scale consumption only after more then 5 years from now.

From this first selection it has turned out that for the short term batteries are the most viable option. For the non-rechargeable batteries the Li / SOCl₂ type and for the rechargeable types the Li-ion and the NiMH batteries. For the long term application the Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) as energy generator is currently considered to be the best option.

Inhoudsopgave

Management Uittreksel	2
Executive Summary	6
Samenvatting	9
Summary.....	10
Inhoudsopgave.....	11
1. Inleiding.....	13
2. Huidige situatie.....	15
2.1 Militaire systemen.....	15
2.2 Civiele alternatieven voor SMP systemen	15
3. Specificaties Energiebron.....	17
3.1 Algemeen	17
3.2 Vermogen en Energie.....	17
3.3 Afmetingen.....	19
3.4 Overig.....	19
4. Inventarisatie van beschikbare of in ontwikkeling zijnde energiebronnen.....	21
4.1 Systemen voor opslag van elektrische energie	22
4.1.1 Niet-herlaadbare (primaire) batterijen.....	22
4.1.2 Herlaadbare (secundaire) batterijen.....	23
4.1.3 Condensatoren	24
4.1.4 Vliegwielen.....	24
4.1.5 Regeneratieve brandstofcellen.....	25
4.2 Systemen voor omzetting van brandstof in elektrische energie	26
4.2.1 Verbrandingsmotor/generator.....	26
4.2.2 Brandstofcellen.....	27
4.2.3 Microturbine/generator.....	27
4.2.4 Thermofotovoltaïsche generator.....	28
4.3 Door menskracht “aangedreven” systemen	28
4.3.1 Active Tags.....	29
4.3.2 Permanente magneet en draadspoel.....	29
4.3.3 Bayliss Generator	29
4.4 Door externe krachten aangedreven systemen.....	29
4.4.1 Fotovoltaïsche cellen	29
4.4.2 Windenergie.....	30

4.4.3 Waterkracht	30
5. Globale selectie energiebronnen	31
5.1 Aannames.....	31
5.2 Korte termijn.....	31
5.2.1 Selectie.....	31
5.2.2 Test exemplaren.....	32
5.3 Lange termijn	33
6. Conclusies en aanbevelingen.....	35
7. Referenties.....	36
7.1 Referenties in Rapport	36
7.2 Naslagwerken.....	36
8. Verantwoording.....	37
Bijlage A: Overzicht van de Amerikaanse ontwikkelingen op het gebied van energie opslag en opwekking ten behoeve van het “Land Warrior” systeem.....	38
A.1 Algemeen.....	38
A.2 Projecten en instituten	38
A.3 Eisen en wensen aan het systeem “Land Warrior”.....	39
A.3.1 Algemeen	39
A.3.2 Elektriciteitsverbruik van de “Land Warrior”	39
A.3.3 Energiebronnen en systemen	41
A.3.4 Problemen met de energievoorziening	41
A.3.5 Specifiek militaire eisen aan de energiebron voor de gevechtssoldaat	42
A.3.6 Aanbevelingen	43
Bijlage B: Beschikbare systemen voor waterstofopslag	45
Bijlage C: Minimale massa voor verschillende energiesystemen.....	48
Bijlage D: Voorstel voor eerste testserie van mogelijke energiebronnen.....	49
D.1 Energie- en vermogenstest.....	49
D.2 Start-up tijd en Respons tijd test.....	51
D.3 Lage Temperatuur Testen	51

Report Documentation Page

Distributielijst

1. Inleiding

Voor de Koninklijke Landmacht (KL) wordt binnen TNO-Defensieonderzoek gewerkt aan verschillende systemen die in de toekomst deel moeten gaan uitmaken van de uitrusting van de Nederlandse gevechtssoldaat. Veel van deze systemen zijn elektronisch en moeten dus van elektrische energie voorzien worden. Mede omdat er door de verschillende systemen ook verschillende eisen aan de energiebron gesteld worden, wordt tot nu toe vrijwel altijd elk afzonderlijk systeem van een energiebron voorzien. Dit brengt de ongewenste situatie met zich mee dat er door een gevechtssoldaat een behoorlijk aantal verschillende batterijen meegedragen dient te worden.

Om deze situatie te veranderen is bij TNO-MEP een project gestart om de totale energievraag van de verschillende systemen in kaart te brengen en te komen tot een verbeterde energiehuishouding.

In de toekomst zal de rol van de soldaat in het veld naar verwachting toenemen. De soldaat zal in staat moeten zijn meerdere functies in een diversiteit van scenario's te kunnen uitvoeren. Om deze functies te kunnen vervullen dient het systeem gevechtssoldaat te worden uitgerust met een groot aantal elektronische hulpmiddelen zoals: ontkoppeld vizier, head-up display, microfoon, camera, computer, GPS e.d. Deze hulpmiddelen dienen bijvoorbeeld ter verbetering van de zintuiglijke waarnemingen van de gevechtssoldaat.

Welke specifieke hulpmiddelen een gevechtssoldaat nodig zal hebben is afhankelijk van de taak c.q. missie. Ook de steeds verdere gaande digitalisering van het strijdperk maakt dat een soldaat een grote datastroom, beeld en geluid, moet kunnen verwerken en versturen: de gevechtssoldaat als ogen en oren van de commandocentrale.

Door de technologische ontwikkelingen worden deze hulpmiddelen steeds belangrijker en wordt dus ook de energievoorziening voor het systeem gevechtssoldaat steeds belangrijker. Bovendien neemt door de steeds hogere eisen aan het systeem gevechtssoldaat en de toename van het aantal elektronische hulpmiddelen de totaal benodigde energie voor een missie steeds verder toe. De wens naar steeds langere stand-alone tijden, langere missies, versterken dit proces. Dit betekent dat er steeds zwaardere eisen gesteld worden aan de energiebron voor het systeem gevechtssoldaat. Van belang zijn o.a. de energie-inhoud (Wh), het gewicht en volume (specifiek energie [Wh/kg] en energiedichtheid [Wh/dm³] zo groot mogelijk) en de (voor herlaadbare energiebronnen, zo lang mogelijke) cyclische levensduur. Ook moet de energiebron in staat zijn om het gewenste vermogensprofiel (vermogen versus tijd) te leveren.

Omdat er een grote verscheidenheid aan energiebronnen is, is het nodig in het huidige stadium waarin een brede oriëntatie plaats vindt niet alleen accu's als energiebron te beschouwen maar ook andere opties te onderzoeken. De huidige technologieontwikkelingen op het gebied van energieopslag richten zich behalve op accu's ook steeds meer op alternatieven hiervoor.

De mate van mogelijke integratie is afhankelijk van de verschillende gebruikte spanningen en de spanning geleverd door de energiebron, en of het gelijk- of wisselspanning betreft. Bij bestaande systemen is het veelal moeilijk om de werkspanning te wijzigen. Omdat het SMP zich vooral richt op toekomstige ontwikkelingen is het zinvol om de integratie mogelijkheden vanaf het begin zoveel mogelijk mee te nemen.

Om te komen tot een juiste keuze van de energiebron is het van belang dat gegevens over de energie- en vermogensvraag beschikbaar zijn. De energievraag [Wh] wordt bepaald door de gemiddelde vermogensvraag [W] maal de tijd [h] gedurende welke deze beschikbaar moet zijn. Bij de keuze van de nominale capaciteit van een herlaadbare batterij is het ook van belang rekening te houden met de afname van de capaciteit. Dit zogenaamde verouderingseffect verkleint de beschikbare capaciteit van de batterij. Om toch ook nog na een aantal keren laden de benodigde capaciteit ter beschikking te hebben dient de nominale capaciteit overgedimensioneerd te worden. De vermogensvraag [W] wordt bepaald door de grootte van de maximale vermogensvraag. Voor batterijen is er een verschil tussen vermogens en energie levering. Voor systemen met een brandstofvoorraad wordt de systeemgrootte bepaald door de piekvermogensvraag en wordt de brandstofvoorraad bepaald door de energievraag.

Het elektriciteitsverbruik van de gevechtssoldaat als systeem kan opgedeeld worden naar de verschillende elektriciteit verbruikende apparatuur. Voor de verschillende apparaten dient een actief en "slaap" verbruik te worden aangegeven door de bij de ontwikkeling van het betreffende onderdeel betrokken TNO-instituut of bedrijf. Het totale energieverbruik van een specifiek systeem tijdens een specifieke missie kan dan bepaald worden uit de toegepaste apparatuur, de duur van de missie en het percentage actief/non-actief van elk onderdeel.

In het onderhavige rapport wordt een eerste globale inventarisatie van energiebronnen die mogelijk geschikt zijn voor de toekomstige gevechtssoldaat. Behalve van algemene informatie is hierbij ook gebruik gemaakt van informatie beschikbaar uit andere programma's op dit gebied, met name het Amerikaanse ([1], zie bijlage A).

Doel van de inventarisatie is om, tezamen met de nog te formuleren toekomstige eisen, te komen tot een inperking en selectie van de in de toekomst te gebruiken energiesystemen.

In hoofdstuk 2 wordt de huidige situatie bij de KL beschreven, in hoofdstuk 3 worden de verschillende soorten energiebronnen behandeld. In hoofdstuk 4 worden conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan betreffende de verdere gang van zaken in dit project.

2. Huidige situatie

2.1 Militaire systemen

Doordat de inkoopstrategie van de KL al langere tijd gebaseerd is op het inkopen van de best beschikbare spullen, in plaats van eigen ontwikkelingen, kan er een, wat betreft de energievoorziening, ongewenste situatie ontstaan. Elk apparaat heeft momenteel een eigen energievoorziening, omdat het als separaat systeem ontwikkeld en aangekocht is. Een gevechtssoldaat moet dus voor elk stuk uitrusting dat hij meeneemt ook de daarvoor bestemde batterij meedragen. En vaak wordt voor elke batterij ook nog een reserve exemplaar meegenomen.

Een weergave van het batterij pakket wat een huidige militair voor zover bekend bij zich zou kunnen dragen is hieronder gegeven.

Batterij	toepassing	gebruiksduur
2 x alkaline AA-cel (1,5 V)	HV-bril	min 12 uur
2 x alkaline AA-cel (1,5 V)	HV Diemaco	min 12 uur
1 x NiCd AA-cel (1,2 V)	Handradio	
2 x BA 30 (1,5 V)	Zaklamp	
6 x C-cel	LION WB-kijker	
8 x alkaline AA-cel (1,5 V) of BA 5800 lithium (6V) en 1 geheugenbatterij: AA-cel lithium 3,6 V	GPS	

Omdat de uitgangsspanning van een batterij afneemt naarmate hij meer ontladen raakt, is in veel apparatuur een powermanagementsysteem ingebouwd. Dit is echter vaak gebaseerd op het terugbrengen van de ingangsspanning naar een vaste waarde door middel van een variabele weerstand. Het vermogen wat hierbij verloren gaat kan tot 50% van het momentane vermogen bedragen. Dit is ongewenst. Dit maakt het gebruik van één enkele energiebron die voorzien is van verschillende uitgangsspanningen aantrekkelijk. Ook een meer geavanceerd powermanagementsysteem is wenselijk.

2.2 Civiele alternatieven voor SMP systemen

Om te kijken of het energieverbruik van het SMP systeem representatief is voor de prestaties is een korte, onvolledige vergelijking gemaakt van commercieel verkrijgbare alternatieven voor de verschillende onderdelen van het SMP systeem. Op de technische specificaties van de verschillende systemen wordt in onderhavig project niet verder in gegaan.

Enkele voorbeelden van mogelijke alternatieven:

Voor de veldtelefoon is de GSM telefoon een duidelijk alternatief. De techniek hiervan is zeer ver ontwikkeld en wijdverspreid. Een nadeel voor militaire toepassing is dat GSM systemen gebaseerd zijn op een klein zendvermogen in de telefoons, 1-4 W, in combinatie met een dicht netwerk van zendmasten die voor de verdere versturing van berichten zorgen. Deze zendmasten zijn, waarschijnlijk, niet overal beschikbaar en in een gevechtssituatie relatief gemakkelijk uit te schakelen.

Voor het Head Mounted Display (HMD) is een alternatief verkrijgbaar bij V.R. Systems UK. [2] Deze Private Eye™ display is IBM compatibel (CGA, EGA) en heeft een resolutie van 720×280 beeldpunten bij 50 Hz.

Het systeem weegt 2,25 oz. ≈ 64 g. (3,75 oz. ≈ 106 g. met kabel).

Afmetingen: 3×3,3×8,9 cm. (h×b×d)

Het door de Private Eye™ gevraagd vermogen is 0,33 W bij 5 Volt

Ook Kaiser Electro-Optics Inc. levert een Head-mounted Display, de Provieu™ XL-50 en XL-35. De XL-50 heeft een resolutie van 1024×768 beeldpunten en verbruikt 25 W. Deze systemen zijn echter gebaseerd op externe beeldgeneratie. Er is dus een kabelverbinding tussen een externe computer en de HMD. Ook de elektriciteitsvoorziening komt van buitenaf.

Voor een LCD scherm waarop een kaart van de omgeving weergegeven wordt is een *cholesteric* LCD scherm een mogelijk alternatief [3]. Dit scherm heeft alleen energie nodig om een beeld op te bouwen. Hierna kan het scherm losgekoppeld worden van de energiebron terwijl het beeld blijft weergegeven. Verkrijgbaar bij Kent Displays, Inc.

Energieverbruik van een ch-LCD is ongeveer gelijk aan dat van een refreshed type LCD [3], voor de controller 1500 mW en voor het beeldscherm 200 mW. Echter bij een ch-LCD hoeft het beeld maar één keer opgebouwd te worden. Voor een gemiddelde bladzijde uit een boek kost dat ongeveer 0,5 sec. Per keer dat een nieuwe kaart, met nieuwe posities wat extra rekenwerk vereist, wordt opgevraagd zal dat $4 \times 0,5 \times 1700 \times 3600^{-1} = 1,0$ mWh kosten. Waarbij wordt aangenomen dat de opbouw en berekeningen voor de nieuwe kaart 2 seconden in beslag nemen.

Uit de voorbeelden blijkt dat er in de civiele wereld allerlei ontwikkelingen zijn die mogelijk toepasbaar zijn bij het SMP.

3. Specificaties Energiebron

3.1 Algemeen

Tot op heden is er zeer weinig bekend over het energieverbruik van de systemen die bij de KL in gebruik zijn. Om toch een referentiepunt te hebben van waaruit verder gewerkt kan worden en op basis waarvan keuzes voor bepaalde energiebronnen gemaakt kunnen worden is in overleg een lijst gemaakt van de uitrustingsstukken die een toekomstige gevechtssoldaat als basis bij zich zal hebben:

Geïntegreerd Helm Systeem	Zaklamp
Global Positioning System	Computer
Radio	Losgekoppeld vizier
Warmte Beeld	Laser pointer

De minimale periode waarin al deze systemen zonder problemen moeten kunnen functioneren is gesteld op 24 uur. Voor de energievoorziening wordt uitgegaan van één centrale energiebron die de afzonderlijke hulpmiddelen van energie voorziet. Het wapen subsysteem, losgekoppeld vizier en laser pointer, zijn hiervan uitgesloten omdat een vaste verbinding tussen geweer en soldaat niet toelaatbaar is. Mogelijkheden voor bijvoorbeeld tijdelijk los van het systeem kunnen functioneren van bepaalde apparatuur zijn voor zover bekend oplosbaar.

Voor de specifiek militaire eisen aan een energiebron wordt verwezen naar de eisen van het Amerikaanse leger, zie bijlage A.

3.2 Vermogen en Energie

Voor de bepaling van het energieverbruik van de verschillende systemen die onderdeel uitmaken van de bovenvermelde basisuitrusting is uitgegaan van gegevens van het Amerikaanse leger [1].

De volgende vermogens worden dan aan de verschillende systemen toebedeeld (zie tabel 4).

Tabel 1 Vermogen en energievraag voor verschillende systemen gedurende 24 uur.

Systeem	Vermogen [W]	Gemiddeld* [W]	totaal energieverbruik in 24 uur [Wh]
	min.-max.		
Geïntegreerd Helm Systeem	0,25 - 5,8	2,8	67
Global Positioning System	0,6 - 1,8	1,0	24
Radio (ontvangen-zenden)	1,0 - 2,4	1,2	29
Warmte Beeld	0 - 5,5	2,5*	60
Zaklamp	0 - 1,0**	0,3*	7
Computer	1,5 - 15,0	8,3	200
Totaal	10 - 35	16	387
Wapen subsysteem	0 - 7,8	2,78	67

* Gemiddelde over 24 uur.

** De gegeven waarde is een aanname.

De echte werkspanning van de verschillende systemen is onbekend, mede doordat er vaak per systeem een vermogensregeling is toegepast. Het is dus raadzaam om een energiebron te hebben/kiezen die in staat is om een aantal uitgangsspanningen te leveren. Dit kan ook door bijvoorbeeld verschillende aansluitpunten te maken. Uit de huidige gegevens van de KL blijkt dat de meest gebruikte spanningsniveaus 3, 6, 9 en 12 Volt zijn. Een neveneffect van het gebruik van één energiebron met een grote energie-inhoud is dat het spanningsverloop vrij constant is gedurende een groot deel van de werktijd. Bij de bepaling van de grootte van de energie inhoud is het van belang rekening te houden met een eventuele afname van de spanning van de energiebron als de capaciteit bijna opgebruikt is. Het is van belang dat alle systemen gedurende de volle 24 uur voor 100% inzetbaar blijven. Dit betekent dat de energiebron aan het einde van een 24-uurs cyclus, met een gemiddelde vermogensvraag van 16 W, nog steeds het maximale vermogen moet kunnen leveren, gedurende de gespecificeerde tijdsduur.

Een energiebron zal dus minimaal aan de volgende eisen moeten voldoen:

Energie inhoud : 400 [Wh]
 Vermogen (maximum) : 35 [W]
 Uitgangsspanning(-en) : 3/6/9/12 [Volt]

3.3 Afmetingen

Omdat niet alleen het volume maar ook de praktische afmetingen van een energiebron van belang zijn zal een mogelijke energiebron behalve zo klein mogelijk ook aan andere eisen moeten voldoen:

- inpasbaar in draagframe
- zo licht mogelijk
- flexibele afmetingen

Voor batterijen zal waarschijnlijk gelden dat ze wat betreft afmetingen flexibel zullen zijn, zeker met de verdere ontwikkeling van de lithium-polymeerbatterij. Voor de systemen die een brandstofvoorraad nodig hebben is de flexibiliteit te vinden in het separaat van de energieopwekker plaatsen van, eventueel meerdere, brandstofvoorraden. Een kwetsbaar punt is dan wel de verbinding tussen de brandstofvoorraad en de energieopwekker zelf. Dit zou bijvoorbeeld opgelost kunnen worden door integratie in een draagframe of minimalisering van de afstand tussen brandstofvoorraad en energieopwekker.

3.4 Overig

In deze paragraaf zijn gewenste eigenschappen beschreven die niet op voorhand per energiebron bekend zijn. De eigenschappen van de verschillende energiebronnen betreffende deze eisen/verwachtingen zullen getest moeten worden.

Responstijd op vermogenswisselingen

- batterijen : Voor het aangenomen vermogensprofiel worden geen problemen verwacht.
- Brandstofcellen : Hoe het geleverde vermogen, en dan voornamelijk de uitgangsspanning, reageert op vermogenswisselingen is mede afhankelijk van de gebruikte brandstof.
- generator/turbine : Meestal geen problemen om vermogenswisselingen te volgen, vergelijk met gebruik in auto's. Ervaring met kleinschalige versies is nog onbekend.
- Condensatoren : Uitstekend in staat om vermogenswisselingen te volgen.

Opstart tijd

Brandstofcellen presteren pas optimaal bij hun werkt temperatuur 40-80°C. Opwarmtijd ligt momenteel in de buurt van 10-15 minuten. Dit is echter maar eenmalig van toepassing en wordt voor de in dit rapport beschreven toepassing, niet direct als problematisch beschouwd, temeer daar zij ook in koude toestand al vermogen kunnen leveren, zij het beperkt. De overige systemen hebben geen noemenswaardige opstart tijd.

Gevoeligheid voor omgevingseigenschappen (luchtvervuiling, luchtdruk, luchtvochtigheid)

De systemen die invloed ondervinden van de omgeving zijn de brandstofcel, verbrandingsmotoren en de zink-lucht en aluminium-lucht accu's. Van belang zijn de zuurstofconcentratie in de lucht, de concentratie van verschillende vervuilingen zoals CO en CO₂ en de relatieve luchtvochtigheid.

Brandstofcellen zijn erg gevoelig voor CO en soms ook CO₂ aan de waterstofkant (anode) en een te hoge concentratie kan de brandstofcel volledig uitschakelen.

Verbrandingsmotoren zullen weinig last hebben van CO, CO₂ of NO_x vervuiling alleen moet er wel een voldoende zuurstofconcentratie aanwezig zijn. Dit is echter voor de gevechtssoldaat zelf ook van vitaal belang, een verbrandingsmotor zal het waarschijnlijk langer volhouden.

De effecten van strijdgassen op de verschillende energiebronnen is onbekend.

Evenals bij de invloeden van de omgeving zullen strijdgassen waarschijnlijk alleen effect hebben op de systemen die afhankelijk zijn van lucht.

Signaturen

Om te voorkomen dat een gevechtssoldaat eenvoudig op te sporen is door vijandige eenheden is het van belang de volgende eigenschappen van een energiebron te minimaliseren:

- thermisch profiel, wordt veroorzaakt doordat de werktemperatuur van de energiebron boven (of onder) de omgevingstemperatuur ligt. Vooral van belang voor systemen waarin verbranding of exotherme reacties plaats vinden zoals brandstofcellen.
- geluidsprofiel, indien er bewegende delen aanwezig zijn zal er altijd wrijving optreden waarbij ook geluid wordt geproduceerd. Batterijen, condensatoren en brandstofcellen hebben geen bewegende delen en zullen geluidsarm/geluidloos zijn.
- emissies en straling, geen van de mogelijke energiebronnen produceert andere emissies dan diegene die op een gevechtsveld zeer waarschijnlijk aanwezig zullen zijn, zoals koolmonoxide, kooldioxide en NO_x. Kernenergie wordt niet als optie gezien voor de in dit rapport beschreven toepassing.

4. Inventarisatie van beschikbare of in ontwikkeling zijnde energiebronnen

De volgende onderverdeling kan gemaakt worden in de systemen voor energievoorziening

1. Systemen voor opslag van elektrische energie
 - niet-herlaadbare (primaire) batterijen
 - herlaadbare (secundaire) batterijen
 - condensatoren
 - vliegwielen
 - regeneratieve brandstofcellen
2. Systemen voor omzetting van brandstof in elektrische energie
 - Verbrandingsmotor/generator
 - Brandstofcellen
 - Microturbine/generator
 - Thermofotovoltaïsche generator
3. Door menskracht “aangedreven” systemen
 - Active tags
 - Permanente magneet en draadspoel
 - Bayliss Generator
4. Door externe krachten aangedreven systemen
 - zonne energie
 - wind energie
 - water kracht

4.1 Systemen voor opslag van elektrische energie

4.1.1 Niet-herlaadbare (primaire) batterijen

Voor primaire batterijen is het belangrijk dat ze geen hoge zelfontlading hebben tijdens opslag. Dit brengt hoge vervangingskosten met zich mee. De eventuele milieueffecten van de batterij na gebruik zouden in een vergelijking ook meegenomen moeten worden. Op een toekomstig gevechtssveld kan een behoorlijke hoeveelheid verbruikte primaire batterijen terecht komen. Daarnaast is een belangrijk probleem de logistiek ten aanzien van de aanvoer van nieuwe batterijen. In tabel 2 is een overzicht gegeven van de meest voorkomende typen.

Tabel 2 Overzicht van de meest voorkomende typen primaire batterijen.

Koppel	bron	Specifieke energie [Wh/kg]	Theoretisch [Wh/kg]
Zn / MnO ₂	NRC [1]	125	336
Mg / MnO ₂	NRC [1]	100	758
Zn / HgO	NRC [1]	100	255
Zn / Ag ₂ O	NRC [1]	120	288
Zn / AgO		140	445
Zn / O ₂ (air)	NRC [1]	500	1.066
	EPRI [4]	215 (350 in 2002)	
	Electric Fuel [5]	400 (toekomst)	
Al / O ₂ (air)	NRC [1]	300	8.046
Li / SO ₂	NRC [1]	260	1.175
	HDS Systems [6]	250	
Li / SOCl ₂	NRC [1]	320*	1.489
Li / SO ₂ Cl ₂	NRC [1]	450*	1.405
Li / MnO ₂	NRC [1]	230	1.001
Li / (CF) _x	NRC [1]	250	2.180
Li / FeS ₂	NRC [1]	130	1.304

* Deze waarden zijn hoog en momenteel nog niet in produktietypen haalbaar.

4.1.2 Herlaadbare (secundaire) batterijen

Van herlaadbare batterijen zijn behalve de ontladkarakteristieken ook de laadeigenschappen van belang. Daarnaast laadtijd en laadrendement maar ook de logistiek benodigd voor herladen. Er is voor het herladen personeel nodig, laadstations, eventuele brandstof voor de laadstations en dan ook de omzetting op de laadstations van brandstof naar elektriciteit.

In tabel 3 is een overzicht gegeven van de belangrijkste typen. In het algemeen is de specifieke energie (aanzienlijk) lager dan bij primaire batterijen.

Tabel 3 Overzicht van de meest voorkomende typen secundaire batterijen.

Koppel	bron	Specifieke energie [Wh/kg]	Specifiek vermogen [W/kg]	Levensduur* [–]	Kosten [\$/kWh]
Lood Zwavelzuur	Fortune [7]	50	300-400	400-600	120-150
	EPRI [4]	36	310	500	130
	NRC [1]	35-50			400
	(theorie)	(175)			
Ni-Cd	Fortune [7]	50	150-180	800	300-350
	NRC [1]	35-52			600
	(theorie)	(244)			
Ni-MH	Fortune [7]	70-120	180-250	800-2000	150
	EPRI (AB ₅)	50-70	115-180	750-1000	>1000
	(in 2002) [4]	(70-80)	(180-225)	(1000-2000)	(225-500)
	EPRI (AB ₂)	80-90	220	600	450-550
	(in 2002) [4]	(120)	(250)	(>800)	(230-250)
	NRC [1]	55-70			800
Li-ion	Fortune [7]	120-140	200-300	1200	150-180
	EPRI	100-120	300	1200	1000
	(in 2002) [4]	(120-140)	(300)	(>1200)	(200-500)
Li-polymeer	Fortune				125
	EPRI	155	315	600	
	(in 2002)	(200)	(350)	(1000)	
	NRC [1]	150			300
	(theorie)	(358)			

* Aantal laad- en ontladcycli.

4.1.3 Condensatoren

Elektrische energie wordt in deze systemen niet opgeslagen met behulp van een chemische reactie maar als fysisch geadsorbeerde elektrische lading [8]. De basis uitvoering, de parallelle plaat condensator bevat twee, of meervouden daarvan, platen. Één negatief en een positief geladen. Een elektrisch veld ontstaat dus tussen de platen. Hoe dichter de platen bij elkaar komen, hoe meer lading er op de platen kan om een bepaalde veldsterkte [V.m^{-1}] te bereiken. Onderzoek richt zich momenteel op de ontwikkeling van diëlektrische materialen, die tussen de platen geplaatst worden en een hele hoge doorslagspanning hebben, de spanning waarbij er tussen de platen toch stroom gaat lopen. Door de fysische absorptie van de elektrische lading is er geen invloed van reactiesnelheden en kan het systeem zeer hoge laad- en ontlaad stromen aan. Gekenmerkt door hoge specifiek vermogen, tot 1 kW/kg of meer, maar een lage specifieke energie ($\ll 10 \text{ Wh/kg}$) vergeleken met batterijen. Zeer geschikt voor korte opslag en levering van hoge vermogens. Onderzoek op het terrein van de supercondensatoren richt zich voornamelijk op de diëlektrische materialen. De zelfontlading is bij deze systemen erg groot, in de orde van procenten per dag. Een nadeel is verder dat de spanning van een condensator lineair met de ladingsgraad afneemt. Bij batterijen blijft deze min of meer constant totdat de batterij bijna leeg is.

4.1.4 Vliegwielen

Bij vliegwielen wordt de energie opgeslagen in de vorm van rotatie energie. Door de toename van het toerental, omtreksnelheid, van een vliegwiel neemt de opgeslagen energie toe en vice versa. [9,10].

De opgeslagen energie voor een platte schijf kan berekend worden met de volgende formule:

$$E = \frac{1}{4} M R^2 \omega^2$$

E = opgeslagen energie	[J]
M = massa van vliegwiel	[kg]
R = straal van vliegwiel	[m]
ω = frequentie	[sec ⁻¹]

Belangrijke ontwerpcriteria voor vliegwielsystemen zijn de lagering en de energie opname en afgifte. Door de hoge frequentie van de vliegwielen is energiedissipatie door wrijving in de lagering een belangrijke verliespost. Doordat de frequentie van het vliegwiel verandert met de energieopslag/afgifte is er altijd de noodzaak tot energieregeling met het daarbij horende rendement. De energie-inhoud neemt lineair toe met de massa van het wiel maar kwadratisch met de omtreksnelheid en de straal.

Voor grotere energieopslagcapaciteit (grote specifieke energie) is het dus het meest efficiënt om het toerental en de straal van een vliegwiel te vergroten. Dit stuurt het onderzoek naar materialen die de grote middelpuntvliedende krachten die daarbij ontstaan kunnen weerstaan. De sterkte-eis bij het ontwerp van een vliegwiel ligt derhalve ook bij de verstevigings band/ ring om het wiel heen. Een belangrijke rendements-verliespost is de luchtweerstand die het vliegwiel ondervindt. Een oplossing is het onder vacuüm plaatsen van het vliegwiel, dit brengt echter, zeker voor kleinschalige toepassingen, weer extra complicaties met zich mee.

Bij het roteren van een vliegwiel treden er gyroscopische krachten op die het draaien van het systeem bemoeilijken. Verbinden van twee identieke maar contra-roterende vliegwielen met behulp van een starre as, waardoor de gyroscopische effecten van beide vliegwielen elkaar opheffen, kan dit probleem omzeilen. Hierbij dienen de twee vliegwielen wel identiek geregeld te worden. In het algemeen is een generator in het vliegwielstelsel ingebouwd, zodat de energie in elektrische vorm wordt opgenomen en afgegeven.

Evenals bij supercondensatoren is het specifieke vermogen hoog, $\geq 1 \text{ kW/kg}$, doch de specifieke energie laag ($< 10 \text{ Wh/kg}$) in vergelijking met batterijen.

4.1.5 Regeneratieve brandstofcellen

In de regeneratieve brandstofcel wordt toegevoerde elektrische energie omgezet in bijvoorbeeld waterstof en zuurstof. De gevormde waterstof, en eventueel ook de zuurstof, wordt opgeslagen (bijvoorbeeld in hydrides). Zodra elektrische energie nodig is wordt waterstof en zuurstof in de brandstofcel omgezet tot elektriciteit en water.

Het systeem werkt ook met andere redoxkoppels. Een voorbeeld is de RHSS batterij: **Rechargeable Hydrogen Ion Solid State** technologie. Ontwikkeld door AVX en dochter ECR (Elektrochemical Research).[11] Het anode en kathode materiaal bestaat uit een reversibel waterstofion redox koppel deze zijn gescheiden met behulp van een waterstofion geleidend polymeer membraan. Momenteel is de RHSS nog in ontwikkeling, test series zouden eind 1998 worden geproduceerd. Welk redoxkoppel precies gebruikt wordt is nog onbekend.

Nadeel is het (momenteel) veel lagere rendement van deze systemen in vergelijking tot oplaadbare batterijen (circa 50% versus 80-90%).

4.2 Systemen voor omzetting van brandstof in elektrische energie

Voor de systemen in deze paragraaf geldt dat ze ontworpen worden op een bepaalde vermogensvraag. De totale energievraag is hierbij minder van belang omdat die afhankelijk is van de hoeveelheid brandstof die meegenomen wordt / kan worden. Door de hoge specifieke energie van de brandstoffen neemt de gemiddelde specifieke energie van deze systemen toe met toenemende totale energie-inhoud. De volgende systemen zijn in dit verband het belangrijkste:

1. Verbrandingsmotor/generator
2. Brandstofcellen
3. Microturbine/generator
4. Thermofotovoltaïsche generator

4.2.1 Verbrandingsmotor/generator

Hiervoor komen in principe in aanmerking:

- Otto motor
- Diesel motor
- Tweetakt motor
- Wankel motor
- Sterling motor

De brandstof voor de verschillende opties, hierboven vermeld, varieert van benzine, diesel en methanol tot zuivere waterstof. Waterstof is een brandstof die moeilijk op te slaan en te verkrijgen is.

De specifieke energie van koolwaterstoffen is hoog in verhouding tot de huidige batterij technologie. Hierbij dient echter wel rekening gehouden te worden met de vereiste omzetting van de koolwaterstoffen in elektrische energie. Alle hier vermelde systemen produceren in eerste instantie rotatie energie. Deze dient nog, bijvoorbeeld met behulp van een generator, omgezet te worden in elektrische energie. De specifieke energie op basis van een omzetting met een rendement van 25% op basis van LHV is verwerkt in tabel 4.

Tabel 4 *Energiedichtheid van enkele koolwaterstoffen [12].*

Koolwaterstof	Energie dichtheid MJ kg ⁻¹ LHV	Wh kg ⁻¹ $\eta_{LHV} = 25\%^*$
Diesel	42,5	2900
Propaan	46,4	3200
LNG	49,0	3375
Methanol	20,0	1375
Waterstof	≈ 120	≈ 8200

* In deze waarden zijn niet de gewichten van de opslagtanks meegenomen, die met name voor waterstof een aanzienlijke invloed op het gewicht kunnen hebben, zie bijlage B.

4.2.2 Brandstofcellen

In een brandstofcel wordt een brandstof met zuurstof omgezet in water (en CO_2) en elektriciteit. Er zijn twee types brandstofcellen geschikt voor toepassing bij de toekomstige gevechtssoldaat. De polymere brandstofcel (SPFC) en de DMFC (Direct Methanol Fuel Cell). Eventuele andere brandstofcellen werken op een (veel) hogere temperatuur of zijn om andere redenen niet geschikt. Hoge temperatuur vereist een goede isolatie (zwaar en volumineus) en voor de hier behandelde kleinschalige toepassingen is de restwarmte niet nuttig toepasbaar. Dit zal het totaal rendement van een systeem omlaag brengen.

In een SPFC reageert waterstof (in de DMFC methanol) met zuurstof naar water (en CO_2 in de DMFC) en elektriciteit. Doordat de reactanten gescheiden worden door een membraan verlopen deze reacties niet ongecontroleerd zoals bij een verbrandingsmotor het geval is. Het membraan geleid alleen protonen, waterstof atomen zonder elektron. De elektronen die voor de reactie van de protonen met zuurstof naar water nodig zijn lopen via een extern circuit. Via dit circuit kan de elektrochemische potentiaal benut worden. Hoge rendementen zijn hierbij haalbaar doordat allerlei omwegen, verbranding van brandstof, opwekken stoom, aandrijven turbine en generator, die allen een rendement hebben, worden omzeild. De reactie van waterstof en zuurstof kan hierbij gecontroleerd verlopen. Als het externe circuit wordt onderbroken lopen er geen elektronen meer en stopt de reactie. De opgewekte potentiaal is afhankelijk van de reactanten, hier waterstof en zuurstof. De standaard potentiaal is 1,23 Volt, maar door onder andere ohmse verliezen is een praktische waarde ongeveer 0,7 Volt voor een enkele cel.

De benodigde brandstof voor een SPFC is waterstof, dit is echter volgens sommigen geen optie voor gebruik door soldaten op een gevechtsveld (*James Stephens, [13]*). Ook de opslag van waterstof is problematisch, zie bijlage B. De DMFC heeft dan ook als grote voordeel dat een vloeibare brandstof, grote energie inhoud per massa-eenheid, direct gebruikt kan worden. Nadeel is dat het specifieke vermogen en rendement van de DMFC momenteel nog erg laag zijn. De twee belangrijkste verliezen die in de brandstofcel optreden zijn methanol cross-over waarbij methanol door het membraan heen diffundeert wat een spanningsverlies van de elektrode tot gevolg heeft. De tweede spannings-verliespost heeft te maken met de traagheid van de reactie aan de methanol elektrode. Het spanningsverlies kan hier oplopen tot enkele honderden millivolt, op een totale cel spanning van ongeveer 1 Volt.

4.2.3 Microturbine/generator

Net zoals verbrandingsmotoren, genereren turbines in eerste instantie rotatie-energie. Deze dient met behulp van een generator omgezet te worden naar elektrische energie.

De bij het MIT in ontwikkeling zijnde microturbine, [14] heeft een buitendiameter van 12 mm bij een dikte van 3 mm, totaal volume dus ongeveer $0,34 \text{ cm}^3$. Deze microturbine zou een vermogen van 10-20 W bij een brandstofverbruik van 7

gram/uur leveren. Het totale gewicht van het apparaatje is 1 gram. Dit zou resulteren in een specifiek vermogen van 30-60 kW/dm³ en 10-12 kW/kg. Dit is exclusief brandstofvoorraad en een kental gegeven door IDA (MIT) is 2,2 kWh/kg. Wat de eventuele effecten op deze kentallen zijn van opschaling naar grotere vermogens is onbekend.

Een variatie hiervan is de Quasiturbine. [15] Een hybride vorm van een turbine/cilinder motor met een vast zwaartepunt. Door dit vaste zwaartepunt zou deze quasiturbine geen last van vibraties hebben. Eenmaal opgestart heeft het systeem zeer weinig massatraagheid nodig door de hoge opvolgsnelheid van de verbrandings-stappen. Hierdoor zijn zeer snelle vermogenswisselingen mogelijk.

4.2.4 Thermofotovoltaïsche generator

Gebaseerd op hetzelfde principe als de fofotovoltaïsche cellen, echter in deze systemen wordt de stralingsbron niet door de zon maar door een thermisch blok gevormd. Dit blok wordt verhit door verbranding van een geschikte brandstof. Door de hoge temperatuur van het blok, vaak > 2000 °C, ontstaat er straling die door de TPV cellen wordt omgezet in elektriciteit. [16,17]

4.3 Door menskracht "aangedreven" systemen

Een mens verbruikt tussen de 100 en 1600 W voor verschillende activiteiten. [18] Een deel van deze energie komt vrij als lichaamswarmte, bij ongeveer 37 °C, een ander deel als bewegingsenergie. Om deze energie te kunnen toepassen is omzetting naar elektrische energie nodig. Het gebruiken van de lichaamswarmte van de soldaat wordt voor SMP niet als optie gezien. Het beschikbare vermogen is erg laag en de soldaat zou van allerlei lichaamsbedekkende apparatuur moeten worden voorzien, waarbij deze systemen waarschijnlijk behoorlijk de bewegingsvrijheid verminderen. De algemene werkingsprincipes van de meest veelbelovende opties voor toepassing in SMP systemen worden hieronder behandeld.

Om te voorkomen dat een soldaat continu actief moet bezig zijn om energie op te wekken is voor deze opties altijd een energieopslag-medium nodig. De invulling daarvan kan variëren van accu's via condensatoren naar mechanische veren.

Onderstaande opties zijn allemaal gebaseerd op beweging, actief of passief, van de gevechtssoldaat. Hierbij betekent de term actief dat een soldaat bewust bezig is met de energieopwekking, bij passieve opwekking kan de energie bijvoorbeeld opgewekt worden door lopen, kniebewegingen, van de soldaat.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen drie typen systemen:

1. Active tags
2. Permanente magneet en draadspoel
3. Bayliss generator

4.3.1 Active Tags

Hoewel hierover nog geen nadere gegevens van bekend zijn, zijn deze tags waarschijnlijk gebaseerd op piëzo effecten. [19] In een piëzo keramische element ontstaat een elektrische lading als het element mechanische verbogen wordt. Als het element niet kortgesloten is ontstaat er een spanningsverschil tussen de lagen van het element, gerelateerd aan deze lading. Dit proces kan ook omgekeerd worden toegepast; door het aanleggen van een spanningsverschil zal een piëzo element verbuigen.

4.3.2 Permanente magneet en draadspoel

Door een magneet heen en weer te bewegen door een draadspoel ontstaan er in de draadspoel lorentzkrachten [20]. Door deze lorentzkrachten gaat er iedere keer een stroompje lopen in de draadspoel.

Nadeel van dit systeem is dat een soldaat actief moet laden, hierdoor wordt de aandacht afgeleid van het gevechtsveld. Een ander nadeel is het gewicht van de magneet en het permanente magneetveld dat om het apparaat aanwezig is. Tevens is er een opslagmedium nodig voor de opgewekte energie. Hiervoor zal een (super)condensator, herlaadbare batterij of een combinatie van beide nodig zijn.

4.3.3 Bayliss Generator

De werking is volgens het principe van de opwindwekker. Een veer wordt handmatig opgewonden en drijft daarna een generator aan. Momenteel toegepast in de Baygen™ Freeplay radio. [21] Hiervoor geldt dat het systeem als nadeel heeft dat actief geladen moet worden.

4.4 Door externe krachten aangedreven systemen

4.4.1 Fotovoltaïsche cellen

Beter bekend als de zonnecel of PV-cellen. De blauwe spiegellende platen van, amorf of kristallijn, silicium. De energieopwekking van deze systemen is afhankelijk van het schijnen van de zon en ze zullen dus gedurende de nacht geen energie opwekken.

Doordat deze systemen afhankelijk zijn van het weer en door het spiegellende oppervlak van de PV cellen moeilijk te camoufleren, zijn deze systemen minder geschikt voor toepassing op een gevechtsveld. Indien toepassing wel mogelijk is zal dit in het algemeen plaats moeten vinden in combinatie met een energieopslagsysteem, bijvoorbeeld batterijen. Hierbij zal de batterij de hoofdopslag zijn. Door de PV cellen kan mogelijk een langere gebruikstijd van de batterij worden bereikt.

4.4.2 Windenergie

Net als met zonne energie zijn dit soort systemen afhankelijk van het weer en niet direct draagbaar. Ook dit systeem kan eventueel wel een basispost van energie voorzien. Waarbij tevens een energieopslag systeem benodigd zal zijn.

4.4.3 Waterkracht

Een door waterkracht aangedreven systeem is niet direct afhankelijk van het weer maar wel van de aanwezigheid van voldoende water dat met voldoende snelheid stroomt. Zoals vermeld bij de twee boven beschreven systemen is ook dit systeem in het algemeen niet toepasbaar voor een gevechtssoldaat maar wel mogelijkwijs voor de energievoorziening van een basispost.

5. Globale selectie energiebronnen

Voor de eerste globale selectie van energiebronnen die in aanmerking komen om getest te worden of ze geschikt zijn voor toepassing in het SMP project zijn twee perioden van belang. In eerste plaats de korte termijn, waarvoor de energiebronnen binnen enkele jaren op grote schaal commercieel verkrijgbaar moeten zijn. Als tweede periode de lange termijn, waarvoor de energiebronnen pas verwacht worden om over meer dan 5 jaar commercieel verkrijgbaar te zullen zijn.

Bij de selectie van de energiebronnen wordt ervan uitgegaan dat de energiebronnen elk afzonderlijk in staat moeten zijn om het vereiste vermogensprofiel te leveren. Een combinatie van bijvoorbeeld een brandstofcel met een condensator voor de piekvermogens is niet toelaatbaar omdat dat een limiet zet op de tijd dat het maximale vermogen geleverd kan worden. Daarom is het wenselijk om in een vroeg stadium na te gaan of de geselecteerde energiebronnen aan de globale specificaties kunnen voldoen. Een voorstel voor de eerste globale testen is gegeven in bijlage D.

5.1 Aannames

Voor de keuze van de energiebron is een aantal gegevens nodig. Omdat deze tot op heden nog niet of slechts onvolledig bekend zijn, zijn de waarden van de volgende variabelen afgeschat:

Werkspanning van de energiebron	: 7,2 Volt
Totale energieverbruik van systeem gedurende 24 uur	: 400 Wh
Minimale en maximale vermogensvraag van systeem	: 15-35 W
Temperatuurgebied waarin de energiebron moet kunnen functioneren	: -25°/+40°C

Voor de eisen wat betreft massa en volume van de energiebron zijn er geen specifieke eisen opgesteld, uitgegaan wordt van een situatie waarin de energie- en vermogeneisen dominant zijn. De massa en het volume van de energiebron dienen geminimaliseerd te worden voor deze eisen.

5.2 Korte termijn

5.2.1 Selectie

Op de hierboven omschreven korte termijn zijn nog geen alternatieven beschikbaar voor de batterij, primaire en secundaire. Dit betekent dat er een selectie gemaakt wordt uit de in hoofdstuk 4 gegeven batterij typen.

Als er voor de eerste globale selectie alleen gekeken wordt naar de specifieke energie van de verschillende batterijen dan komen van de primaire batterijen de

lithium batterijen als beste naar voren, de $\text{Li} / \text{SOCl}_2$ heeft van deze momenteel het grootste productie volume. De Al / O_2 (lucht) batterij heeft naast de lithium batterijen ook een hoge specifieke energie maar is niet geschikt voor het leveren van hoge vermogens.

Van de secundaire batterijen zijn het wederom de lithium batterijen die de grootste specifieke energie hebben. Echter de beschikbaarheid van deze systemen is momenteel nog vaak gebonden aan specifieke apparatuur. Om die reden komen ook de NiMH systemen in aanmerking voor de eerste globale testen. De lithium-polymeer batterijen worden momenteel alleen nog maar aan OEM's (Original Equipment Manufacturer) geleverd. Voor onderzoeksdoeleinden en de vervangingsmarkt zijn ze dus nog niet beschikbaar. Lithium-organo-sulfur batterijen (~300 Wh/kg) zijn momenteel nog niet in de productiefase maar verwacht wordt dat dat binnen enkele jaren het geval zal zijn. Hierdoor kunnen ze nog niet meegenomen worden in de eerste serie, globale, testen maar komen ze wel in aanmerking voor de korte termijn voor de SMP toepassing.

De uiteindelijke opbouw van het energiesysteem zal gebaseerd worden op de gedetailleerde specificaties. Dit betekent dat de primaire uitgangsspanning van het batterij pakket zal liggen op het niveau waarop ook de meeste apparatuur functioneert, en dus het meeste vermogen gevraagd wordt. De overige spanningen kunnen dan gegenereerd worden met behulp van hoog-rendements DC/DC convertoren.

5.2.2 Test exemplaren

De eerste serie testen zullen worden uitgevoerd met een batterijpakket dat een gereduceerde energie-inhoud heeft. Uitgangspunt is ongeveer 175-200 Wh. Deze systemen bieden de vereiste representativiteit betreffende de integratie aspecten en kunnen al een goed beeld geven over de te verwachten afmetingen, volume en gewichten van het totale batterijpakket.

In eerste instantie zal een dergelijk batterijpakket groter en zwaarder zijn dan elke afzonderlijke batterij die momenteel in gebruik is. Ter vergelijking dient echter het gehele plaatje in beschouw genomen te worden, dus het hele pakket van verschillende batterijen dat door de soldaat meegenomen dient te worden.

De volgende batterijen zijn gekozen om een eerste serie testen te ondergaan.:

Batterij	NiMH	Li-ion	LiSOCl ₂
Leverancier	SAFT	SAFT	SAFT
Type	VH D 085 D-cel	mpc176065	LSH20 D-cel
Capaciteit (cel)	8 Ah	4,5 Ah	13 Ah
Spanning (cel)	1,2 Volt	3,6 Volt	3,6 Volt
Afmetingen (cel) [mm]	33,6(Ø)×61,3	18×60×65	33,6(Ø)×61,3
Gewicht (cel) [gram]		150	100
Capaciteit (pakket)	24 Ah	22,5 Ah	39 Ah
Spanning (pakket)	7,2 Volt	7,2 Volt	7.2 Volt
Afmetingen (pakket)	3 parallel	5 parallel	3 parallel
samengesteld door fabrikant	6 series	2 series	2 series
Gewicht (pakket) [gram]		± 1500	± 600

Het NiMH batterijpakket is wel geselecteerd echter de leverancier bleek, nog, niet in staat om hiervoor een offerte te maken.

Alhoewel in alle gevallen SAFT als leverancier wordt genoemd, betekent dit niet dat er geen andere mogelijkheden zijn. SAFT is alleen om praktische redenen gekozen en andere leveranciers zijn/worden eveneens benaderd om een test systeem te leveren.

5.3 Lange termijn

Op de lange termijn wordt ervan uitgegaan dat de in dit rapport beschreven systemen commercieel verkrijgbaar zullen zijn. Verder wordt ervan uitgegaan dat de verbeteringen in de specifieke energie van de huidige batterijen niet verder zullen reiken dan 200-250 Wh/kg. Hoewel die waarden op zichzelf al erg hoog zijn blijven ze wel achter bij de specifieke energie waarden die bereikt kunnen worden indien gebruik gemaakt wordt van vloeibare organische koolwaterstoffen. (zie tabel 4)

De door menskracht, zonne-, water- en wind- energie systemen worden momenteel niet als reële optie gezien voor de SMP toepassing. Ze hebben of een te klein vermogen of zijn te afhankelijk van externe, niet beïnvloedbare, omstandigheden zoals het weer. Zoals uit hoofdstuk 4 en bijlage C blijkt is energieopslag in vliegtuigen of condensatoren geen optie door de lage specifieke energie van deze systemen.

Groot voordeel van de systemen die voorzien zijn van een brandstofvoorraad is dat ze gedurende de periode dat er brandstof beschikbaar is in principe volledig nominaal functioneren. Er is dus geen afname in celspanning naar gelang de opgeslagen energie verbruikt wordt zoals bij batterijen wel het geval is. Het gebruik van een externe brandstofvoorraad kan in eerste instantie bij de gevechtssoldaat op weerstand stuiten maar voor dit project wordt ervan uitgegaan dat die te overkomen zijn.

De keuze voor de lange termijn met betrekking tot opwekking van energie gaat tussen de turbine/generator combinatie en de polymere brandstofcellen. Voor de turbine/generator combinatie zijn de microturbine, momenteel bij MIT in ontwikkeling en de Quasiturbine van L'Equipe Saint-Hilaire du Quebec interessant. Voor de brandstofcellen is er de SPFC met waterstof als brandstof, de DMFC met methanol als directe brandstof en de SPFC met een vloeibare brandstof die in een reformer omgezet wordt naar een waterstofrijk gas wat weer gebruikt wordt in de brandstofcel. Omdat de turbine / generator combinaties bewegende delen bevatten en dus waarschijnlijk kwetsbaarder zijn gaat in eerste instantie de voorkeur uit naar de brandstofcellen.

Voor de brandstofcellen systemen zijn drie opties behandeld. Van het systeem met waterstofvoeding is het voordeel ook gelijk het nadeel, het gebruik van waterstof. Opslag op de soldaat is voor sommigen geen optie (*Stephens* [13]) en distributie, opslag en produktie van waterstof op een gevechtsveld is problematisch. Het systeem met de omzetting van een, vloeibare, brandstof in een waterstofrijk gas vereist een additioneel complex systeem van reformer met de daarbij horende randapparatuur. Voor de energiebron op de lange termijn voor de toekomstige soldaat gaat derhalve ook momenteel de keuze uit naar de DMFC.

6. Conclusies en aanbevelingen

In dit rapport wordt een globale weergave gegeven van de mogelijke energiebronnen voor een toekomstig soldaat systeem. Enkele hiervan zullen vrij snel, uit praktische overwegingen, afvallen. Verschillende van de in dit rapport vermelde energiebronnen zijn nog in het ontwikkelingsstadium en zullen naar verwachting niet binnen korte tijd op grote schaal beschikbaar komen. Er kan en dient echter bij het ontwerp van een energiesysteem wel rekening gehouden te worden met de mogelijkheid om de energiebron in de toekomst te vervangen.

In bijlage C is voor verschillende systemen een indicatie gegeven van de massa die minimaal benodigd is om aan de in dit rapport, hoofdstuk 3, vermelde energie en vermogens-eisen te voldoen. Uit de gegevens van bijlage C blijkt dat indien batterijen gebruikt worden de primaire batterijen een grotere specifieke energie hebben en dus een lager systeem gewicht zullen opleveren. Een nadeel is echter dat voor primaire batterijen geldt dat leeg = leeg. Secundaire batterijen kunnen opgeladen worden. Voor systemen met een brandstofvoorraad is "bijladen" nog makkelijker. Voor een juiste keuze van de energiebronnen waar nader onderzoek naar gedaan zal worden is het van groot belang om een enigszins representatieve aanname te hebben van het energieverbruik en vermogensvraag van een toekomstig soldaat systeem. Het wordt dan ook uiterst nuttig geacht om voor de verschillende systemen die momenteel bij de TNO-defensieonderzoek instituten in ontwikkeling zijn een energie en vermogensprofiel te laten opstellen, bij voorkeur uit metingen. Ook van de systemen die momenteel in gebruik zijn of binnen afzienbare tijd operationeel worden wordt aanbevolen om behalve de eigenschappen van de gebruikte energiebron ook de daadwerkelijke energie en vermogens eigenschappen vast te stellen. Dit mede omdat in de praktijk blijkt dat in verschillende apparaten nog een vermogensregeling zit die een significant energieverlies kan veroorzaken.

In de volgende fase van dit project kunnen de volgende stappen worden genomen:

- Een eerste globale test uitvoeren van de geselecteerde energiebronnen die aan de globale selectiecriteria voldoen of waarvan verwacht kan worden dat ze in de nabije toekomst aan de criteria kunnen voldoen. Een opzet voor de testen is gegeven in bijlage D. Een testexemplaar kan eventueel een terug geschaalde versie zijn van de uiteindelijk benodigde energiebron.
- Voor de systemen die momenteel nog in ontwikkeling zijn zal een inschatting worden gemaakt van wanneer een productiefase bereikt zou kunnen worden. Tevens zullen de verdere ontwikkelingen gevolgd worden en eventuele nieuwe mogelijke energiebronnen worden voorgedragen aan de KL.
- De instituten van TNO-Defensieonderzoek zullen nogmaals worden benaderd om een representatieve weergave van het energieverbruik van de daar in ontwikkeling zijnde apparatuur beschikbaar te stellen.

7. Referenties

7.1 Referenties in Rapport

1. Energy Efficient Technologies for the Dismounted Soldier, National research Council, National academic Press, 1997 ISBN 0-309-05934-8
2. <http://www.gkc.co.uk/~vr-systems/text/priveye.html>
3. *J.W. Doane, X.Y. Huang, A. Khan, D. Davis, G. Podojil, N. Miller & C. Jones*, Paper-Like Displays for Electronic Books, Kent Displays, Inc.
4. <http://www.epri.com/csg/trans/usabc/batttechdevelopment.htm>
5. <http://www.electric-fuel.co.il/cs/defense/index.html>
6. <http://www.hdssystems.com/LithiumBattery.htm>
7. <http://www.pathfinder.com/fortune/1997/971027/imt.html>
8. <http://www.ecr.co.uk.il/super.html>
9. <http://home.earthlink.net/~fradella/homepage.htm>
10. <http://web.mit.edu/aeroastro/www/labs/GTL/research/micro/micro.html>
11. <http://www.ecr.co.il/rhiss.html>
12. *Voss H., Huff J.*, Portable fuel cell power generator, Journal of Power Sources, **65** (1997) 155-158.
13. *Felix.H. Büchi (editor)*, Proceedings of the Portable Fuel Cells conference, 21-24 june 1999, Luzerne Switzerland.
14. http://www.ida.org/MEMS/pimeetingjan_2/...
15. <http://quasiturbine.promci.qc.ca/...>
16. <http://www.mtiresearch.com/tpv.html>
17. <http://stuweb.ee.mtu.edu/~mdkaun/Projects/PS/tpv/works.htm>
18. *T.E. Starnner*, Human Powered Wearable Computing, IBM Systems Journal **35**, No 3&4.
19. <http://www.piezo.com/appdata.html>
20. <http://www.columbinesales.com>
21. <http://www.freeplay.net/ppg.htm>
22. *Browning D., Jones P., Packer K.*, An investigation of hydrogen storage methods for fuel cell operation with man-portable equipment, Journal of Power Sources, **65** (1997) 187-195.

7.2 Naslagwerken

- Energy Efficient Technologies for the Dismounted Soldier, National research Council, National academic Press, 1997 ISBN 0-309-05934-8
- *Felix.H. Büchi (editor)*, Proceedings of the Portable Fuel Cells conference, 21-24 june 1999, Luzerne Switzerland.
- Proceedings of, Commercialization of Small Fuel Cells & the Latest Battery Technologies for Portable Applications, 29-30 April 1999, The Bethesda Marriott, Bethesda, MD, The Knowledge Foundation.
- *D. Linden*, Handbook of Batteries, 2nd Ed. Mc Graw-Hill 1995

8. Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever:

Lt.kol. J. Meijer, programmaleider Soldier Modernisation Programme
Afd. Beleidsontwikkeling Operationeel Beleid & Training
Directie Beleid en Planning
Koninklijke Landmacht
Postbus 3003
3800 DA Amersfoort

Namen en functies van de projectmedewerkers:

Ir. J.W. Raadschelders	projectleider
Dr.ir. D. Schmal	coördinator electrochemie

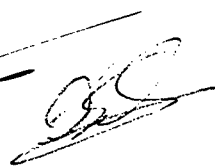
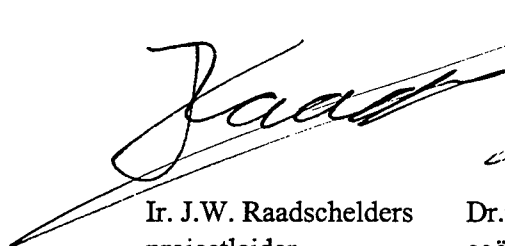
Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed:

N.v.t.

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad:

mei - december 1999

Ondertekening:



Ir. J.W. Raadschelders
projectleider

Dr.ir. D. Schmal
coördinator
Elektrochemie

Goedgekeurd door:



Drs A.E. Jansen
afdelingshoofd Procestechnologie

Bijlage A: Overzicht van de Amerikaanse ontwikkelingen op het gebied van energie opslag en opwekking ten behoeve van het “Land Warrior” systeem

A.1 Algemeen

De Amerikaanse versie van het SMP is de “dismounted soldier” of “Land Warrior”. Hiervoor wordt intensief onderzoek gedaan bij verschillende Amerikaanse overheden en instellingen. Dit document is bedoeld om een overzicht te geven van de ontwikkelingen en de richting die het onderzoek op dit gebied in de Verenigde Staten op gaat, met name op het gebied van energie opslag (en energieopwekking). Er is voornamelijk gebruik gemaakt van een Amerikaans rapport opgesteld onder verantwoording van NRC [1]. Deze informatie vormt één van de startpunten van het Nederlandse deelproject met betrekking tot de energievoorziening van SMP systemen.

A.2 Projecten en instituten

Voor de toekomstige ontwikkelingen van het Amerikaanse leger lopen er verschillende projecten. De belangrijkste daarvan zijn:

Army Force XXI Land Warrior Upgrade voor de periode 2000-2015

Army After Next (AAN) voor de periode 2015-2025.

De verantwoordelijkheid voor al deze projecten ligt bij het ministerie van Defensie (DoD) maar de uitvoering berust vaak bij andere overheidsinstellingen. Enkele voor deze projecten belangrijke organisaties zijn:

- Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA),
- The Institute for Defense Analysis (IDA), een onderdeel van DARPA.
- The National Research Council (NRC)
- The Army Material Command (AMC)
- The Soldier Systems COMmand (SSCOM)
- The TRaining and DOctrine Command (TRADOC)
- The Electric Power Research Institute (EPRI).

Door de National Research Council (NRC) is onderzoek gedaan naar de toekomstige toepasbaarheid en mogelijkheden van de Dismounted Soldier, alsmede de problemen die zich daarbij kunnen voordoen.

A.3 Eisen en wensen aan het systeem "Land Warrior"

A.3.1 Algemeen

De uitrusting van de toekomstige soldaat zal aan een aantal eisen moeten voldoen en voorzien zijn van de volgende onderdelen: een helm subsysteem en een wapen subsysteem. Deze worden gecombineerd met behulp van een computer en zullen onder andere een radio, displays, sensoren en andere elektronische hulpmiddelen omvatten. De eerste systemen staan gepland voor 1999 en in 2003 wil het Amerikaanse leger er 43.000 actief hebben. Het totale systeem wordt verwacht ongeveer 18-20 kilo te wegen en, als alle subsystemen actief zijn, meer dan 50 W elektriciteit te gebruiken.

A.3.2 Elektriciteitsverbruik van de "Land Warrior"

Het elektriciteitsverbruik van de soldaat zal, volgens het Land Warrior programma, in de toekomst behoorlijk toenemen. Een inventarisatie van de te verwachten energie gebruikende apparatuur en het daarbij horende vermogen voor de verschillende systemen is gegeven in tabel A-1.

Communicatie, computers, beeldschermen en sensoren

Door de speciale eisen die aan militaire toepassingen gesteld worden is directe toepassing van commercieel verkrijgbare technologie in het systeem moeilijk. Echter, het totale energieverbruik van het "Land Warrior" systeem kan in principe teruggebracht worden van 50 W naar minder dan 10 W, enkel en alleen door het energie efficiënter ontwerpen van het systeem [1]. Of dit in de praktijk haalbaar is moet echter nog blijken.

Voor het Land Warrior systeem wordt uitgegaan van één centrale computer die continu actief moet zijn. Deze vraagt een vermogen van ongeveer 15 W. Dit kan met gebruik van verschillende, laag vermogen processors voor de verschillende toepassing teruggebracht worden naar 0,15 W.

De radiocommunicatie is ook een energie intensief onderdeel. Hiervan is echter het energieverbruik fysisch bepaald. De benodigde energie neemt ongeveer kwadratisch toe met de communicatie afstand. Toch zullen missies in de toekomst juist een grotere communicatie afstand vereisen.

Door de excessieve energie eisen van communicatie en computer apparatuur in het "Land Warrior" systeem is er een gerede kans dat het uiteindelijke zelf ontwikkelde systeem voorbijgestreefd wordt door commercieel verkrijgbare technologie. Vraag is hierbij wel of deze zonder meer aan de Land Warrior eisen voldoet. Hiervoor zullen waarschijnlijk aanpassingen nodig zijn.

Digitalisering

Een belangrijke factor in een gevechtssituatie is informatie. Het gaat hierbij om verkrijgen van informatie, het voorkomen dat de vijand informatie verkrijgt of het doorspelen van foutieve informatie, over het gevechtsveld, naar een tegenstander. Hierbij spelen de gevechtssoldaten een belangrijke rol, als vooruitgeschoven verkenningssoldaten. Het versturen van beeld, spraak en data vereist echter veel energie. Data compressie en een inventarisatie van de minimale benodigdheden, bijvoorbeeld beeldresolutie, bieden een goede mogelijkheid voor energiebesparing.

Tabel A-1 De vermogensvragen vergeleken met verwachtingen ten aanzien van datgene dat met commerciële technologie haalbaar is.

	Land Warrior 2001 (active) [Watt]	Commercial Technology 2001 [Watt]
Computer/Radio Substelsysteem		
Computer	14.80	0.15
Hand-Held Flat Panel Display	6.40	0.20
Soldier Radio		
Receive	1.40	0.10
Transmit	6.00	1.60
Squad Radio		
Receive	2.00	—*
Transmit	12.00	—*
Global Positioning System	1.50	0.10
Video Capture	1.00	0.05
Subtotal	45.1	2.2
Integrated Helmet and Sight Subsystem (IHAS)		
Laser Detectors	0.60	0.05
Helmet-Mounted Display	4.90	0.22
Imager	0.10	0.05
Subtotal	5.6	0.32
Weapon Subsystem		
Laser Rangefinder	0.1	0.05
Laser Aiming Light	0.1	0.005
Digital Compass	0.4	0.005
Thermal Weapon Sight	5.5	1.10
Subtotal	6.1	1.16
TOTAL	57.0	3.78*

bron: [1]

LET OP!

- * Bij de totale vermogensvraag van de commerciële technologie is de "squad radio" weggelaten. Dit is gedaan omdat de vermogensvraag hiervan bepaald wordt door de systeemopbouw. Wil men op dit vermogen besparen dan zal de systeemopbouw veranderd moeten worden.

A.3.3 Energiebronnen en systemen

Voor de energievoorziening van het systeem wordt door het Amerikaanse leger vooral gekeken naar de volgende opties. Opgedeeld in drie groepen, in volgorde van belangrijkheid / kans van slagen:

A) Batterijen

- De huidige commerciële / militaire niet herlaadbare (primaire) batterijen, deze komen tot ongeveer 450 Wh/kg.
- Toekomstige herlaadbare (secundaire) lithium batterijen komen tot waarden hoger dan 200 Wh/kg.

Voor langere missies waarbij meer energie nodig is zullen opwekkingssystemen in combinatie met hoog energetische brandstoffen gebruikt worden om de batterijen bij te laden.

B) Thermovoltatische systemen, alkaline-metaal thermisch naar elektrisch omzetters, microturbines en menskracht.

C) Nucleaire energiebronnen. Met specifieke energie (Wh/kg) orden van grootte hoger dan de andere opties lijken ze de ideale oplossing. Missietijden van maanden of zelfs jaren zijn dan mogelijk. De problemen zijn echter ook legio, onder andere:

Aan/uit schakelen van radio-isotopen is onmogelijk

Mogelijke gevaren voor de gezondheid en het milieu.

Een bijkomend nadeel is dat de vermogensdichtheid (W/kg) van deze energiebron niet groot is.

A.3.4 Problemen met de energievoorziening

Het IDA (Institute for Defense Analysis) heeft een aantal problemen rond de energievoorziening van de gevechtssoldaat geïdentificeerd.

- Het gewicht en de afmetingen van de huidige technologie
- De kosten van het huidige systeem (US\$ 200M voor Desert Storm)
- Aan- en afvoer van niet herlaadbare (primaire) batterijen
- Herladen van herlaadbare (secundaire) batterijen: laadtijd, logistiek, mankracht
- Generators: groot, luidruchtig en groot thermisch profiel
- Toekomstige systeemeisen

(bron: *MEMS Transition Opportunities*, january 15, 1998)

Uit dezelfde publicatie komen de volgende selectiecriteria voor nieuwe energiebronnen:

- Energie- vermogens dichtheid
- Ontlaad profiel
- Zelfontladings profiel
- Kosten
- Herlaad rendement
- Milieuaspecten

Een eerste schatting van het energieverbruik gedurende een driedaagse missie wordt door bovenvermelde bron gedaan op 500-1000 Wh, hierbij mag de energiebron niet meer wegen dan 1,5 kg.

A.3.5 Specifiek militaire eisen aan de energiebron voor de gevechtssoldaat

Aan de verschillende onderdelen van het systeem worden voor militaire toepassingen andere/zwaardere eisen gesteld dan voor civiele toepassingen. Dit maakt het toepassen van op de civiele markt beschikbare alternatieven gecompliceerder dan in eerste instantie gedacht zou kunnen worden. Er dient echter wel degelijk gekeken te worden naar mogelijke civiele alternatieven en de aanpassingen die gedaan zouden moeten worden om ze voor militaire toepassingen geschikt te maken. Ook dient nagegaan te worden in welke mate de eisen aangepast kunnen worden aan datgene wat beschikbaar is (conform de aanbevelingen van NRC ten behoeve van de "Land Warrior").

A.3.5.1 Primaire eisen

Tijd

De benodigde stand-alone tijd voor de gevechtssoldaat is afhankelijk van de missie en de eventuele mogelijkheid om ergens bij te laden. Een mobiel platform met laadmogelijkheid als uitvalspunt verkleint de benodigde stand-alone tijd drastisch.

Gewicht

Voor de Amerikaanse situatie wordt door IDA uitgegaan van een gewicht van de energiebron van 0,5 kg/dag. Dit betekent dat voor een driedaagse missie de energiebron maximaal 1,5 kg mag wegen. Deze missieduur afhankelijke gewichtseis maakt het noodzakelijk om verschillende opties voor de energiebron te bekijken voor de verschillende missietijden. Voor een korte missie is er maar een laag gewicht toegestaan en kan een energiesysteem niet al te gecompliceerd / volumineus zijn. Voor langere missies is de gewichtsmarge ruimer.

Volume

Specifieke eisen zijn nog onbekend maar logischerwijs zal een zo klein mogelijk volume wenselijk zijn. Ook variabele dimensies in plaats van vaste afmetingen van een energiebron zijn voordelig. Hierdoor kan een energiebron op elke wenselijke/noodzakelijke plek van de uitrusting geïntegreerd worden. Op korte termijn dient echter rekening gehouden te worden met de afmetingen van de huidige energiebronnen waarvoor een nieuw systeem in de plaats moet komen.

A.3.5.2 Secundaire eisen

Betrouwbaarheid

Natuurlijk mag iets niet zomaar kapot gaan en stelt een militaire toepassing hogere eisen aan een energiebron maar ook bijvoorbeeld de inschakel- en opwarmtijd van een apparaat dient voor militaire toepassing minimaal te zijn.

Temperatuurbereik

Momenteel is alleen een ondergrens gegeven aan het temperatuurbereik waarbinnen de energiebron nog naar eis moet functioneren. Deze ligt momenteel op - 40 °C. Dit blijkt echter voornamelijk te gaan om opslag eisen. Een gebruiksondergrens van - 25 °C of nog hoger lijkt meer waarschijnlijk.

Schokbestendigheid

De toepassing van een energiebron in het SMP stelt geen extreem hoge eisen aan de schokbestendigheid.

Kogelpenetratie

Een eis die voor commerciële apparatuur niet van toepassing is. Voor militaire toepassing is het belangrijk dat een energiebron zo lang mogelijk en onder alle condities blijft functioneren. Een directe treffer in de energiebron mag dan ook in principe niet het hele systeem van de gevechtssoldaat uitschakelen.

Kosten

Hoewel niet als eerste vermeld is het de bedoeling dat kosten voor een energiebron beheersbaar zijn. Dit geldt voor de hele levensloop van een energiebron, van aanschaf en onderhoud tot eventuele kosten van vernietiging of recycling.

A.3.6 Aanbevelingen

Het NRC komt tot de volgende aanbevelingen betreffende de dismounted Soldier[1]:

Het Amerikaanse leger wordt door het NRC **dringend geadviseerd** om de nadruk van het onderzoek voor de "Land Warrior" te verschuiven in de volgende richting:

- | | |
|--------------------------------|--|
| <i>Energie strategie</i> | : Behalve naar energiebronnen óók naar energieverbruikers kijken. |
| <i>Systeem ontwerp:</i> | Bij het systeem ontwerp moet een zo laag mogelijk energiegebruik op alle niveau's als uitgangspunt dienen. |
| <i>Commerciële technologie</i> | : Bij het systeem ontwerp moet de nadruk gelegd worden op de integreerbaarheid van de nieuwste commerciële ontwikkelingen. |

Een algemene aanbeveling wordt gedaan om de eisen die momenteel aan het systeem "Land Warrior" gesteld worden te herzien zodanig dat commerciële ontwikkelingen op een eenvoudige manier gebruikt kunnen worden. Hiervoor dienen deze ontwikkelingen dan ook nauwgezet gevolgd te worden.

De huidige militaire eisen aan een gevechtssysteem zijn nog steeds dat er continu 100% beschikbaarheid van de verschillende subsystemen is. Dat betekent continue open communicatielijnen en beschikbaarheid van energie voor de elektronische hulpmiddelen. De systemen zijn niet ontwikkeld op minimaal energiegebruik en de soldaat wordt niet geleerd om zuinig met energie om te gaan. Hierdoor is op de totale energievraag van een systeem veel meer te besparen dan met een toename van de specifieke energie van een batterij gewonnen kan worden.

Bijlage B: Beschikbare systemen voor waterstofopslag

Voor de eventuele energiebron die als brandstof waterstof gebruikt dient deze ook voorzien te worden van een waterstofbron. Hiervoor zijn verschillende opties mogelijk. De meest bekende worden hieronder beschreven [22]

1. Gehydrogeneerde vloeibare organische componenten
2. Waterstof geabsorbeerd in glazen bolletjes en/of zeolieten
3. Waterstof fysisch gebonden aan koolstof op verlaagde temperatuur en verhoogde druk
4. Vloeibare waterstof
5. Gasvormig waterstof onder druk in conventioneel en composiet ontwerp cilinder
6. Reversibele metaalhydride
7. Irreversibele metaalhydride, waterstof ontsluiting door reactie met water

Elk van deze opslagmethoden heeft specifieke eisen en eigenschappen waardoor ze juist wel of juist niet geschikt (kunnen) zijn voor toepassing in het SMP.

Gehydrogeneerde vloeibare organische componenten

Deze manier van waterstofopslag is gebaseerd op de chemische binding van waterstof aan onverzadigde koolwaterstoffen. Voordelen van waterstofopslag in koolwaterstof is dat deze bij kamertemperatuur vloeibaar zijn, makkelijk op te slaan en te transporteren, en een hoge energiedichtheid hebben. Een voorbeeld hiervan is methyl cyclohexaan (MCH). Na de reversibele reactie met waterstof vormt zich toluen. De déhydrogenering loopt over een edelmetaal katalysator bij 400 °C. Reversibel waterstofopslag bedraagt ongeveer 6,1 % (vloeistof gewicht), waterstofinhoud van MCH is ongeveer 49 g dm⁻³.

Een probleem bij deze manier van waterstofopslag is de MCH na déhydrogenering. Wordt de MCH gedurende de hele missie meegedragen en op de basis weer opnieuw gehydrogeneerd? Dit levert een extra mee te nemen gewicht op, een extra opslag volume, een algehele complexering van het systeem. Het lozen van gevormd MCH tijdens de missie is zonde van de potentiële energie van het MCH. Bij de optie om het MCH te verbranden om extra energie op te wekken dient de vraag zich aan waarom het dan eerst gedéhydrogeneerd wordt. En dit levert ook weer extra systeem complexiteit en massa op.

Waterstof geabsorbeerd in glazen bolletjes en/of zeolieten

Waterstof wordt onder hoge druk en temperatuur in holle glazen microbolletjes of in de poriën van een zeoliet geperst. Na afkoeling zit het waterstof opgesloten in het dan niet meer permeabele glas of in de poriën van de zeoliet. Bij temperatuurverhoging komt het waterstof weer vrij. Voor de zeoliet opslag wordt een opslag van 0,08 % (gewicht) waterstof gemeld. De theoretische mogelijkheden van de opslag in microbolletjes lopen tot 40 % (gewicht). Er is echter weinig gepubliceerd over deze manier van waterstofopslag.

Er valt dan ook nog niets te zeggen over de te verwachten problemen bij deze manier van waterstofopslag. Zoals er zouden kunnen zijn: de productie van de glazen bolletjes, de breekbaarheid van deze bolletjes tijdens missie condities, de massa van de lege glazen bolletjes (vergelijkbaar probleem bij waterstofopslag in gehydrogeneerde koolwaterstoffen), transport van de volle en lege bolletjes in grote hoeveelheden.

Waterstof fysisch gebonden aan koolstof op verlaagde temperatuur en verhoogde druk

De combinatie van hoge druk, lage temperatuur (ruim onder 0 °C) en een materiaal met een hoog specifiek oppervlak, bijvoorbeeld actieve kool, levert synergetische voordelen. Het totale systeem werkt dan echter wel met én hoge druk én met lage temperatuur. Voor de kleinschalig toepassing binnen SMP wordt het systeem zeer waarschijnlijk te gecompliceerd.

Vloeibare waterstof

Door de zeer lage dichtheid van vloeibare waterstof, 0,071 g cm⁻³, een zeer gewichtsefficiënte manier van waterstofopslag. Nadelen hiervan zitten echter in de vereiste lage temperatuur (-253 °C), de daarbij behorende isolatie van opslagcontainers en de dagelijkse natuurlijke verdamping (1-1,5% per dag).

Gasvormig waterstof onder druk in conventioneel en composiet ontwerp

Het voordeel van druktoename voor gasopslag neemt voor waterstof bij toenemende druk sterk af. De thermodynamische eigenschappen van waterstof wijken bij hoge drukken significant af van de ideale gaswet. De opslagdruk opvoeren naar veel hogere drukken brengt niet de verwachte extra opslagcapaciteit omdat waterstof dan nog meer gaat afwijken van de ideale gaswet en de opslagcontainers veel sterker, zwaarder, moeten worden.

De conventionele stalen cilinders, 175 bar, 48 dm³, bevatten ongeveer 1%(gewicht) waterstof. Dit zal voor kleinere cilinders alleen maar afnemen.

Composiet cilinders bestaan uit een naadloze binnen cilinder, meestal aluminium of plastic, die omwonden worden met een composiet vezel voor de sterkte van de cilinder. Hiermee kan de waterstofopslagcapaciteit op gewichtsbasis verdrievoudigd worden ten opzichte van conventionele cilinders.

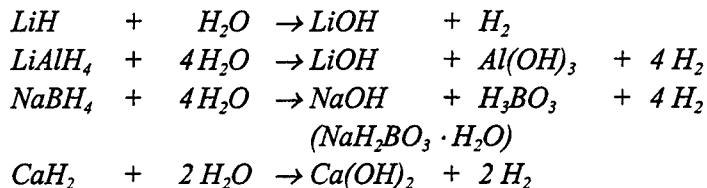
Reversibele metaalhydride

Waterstof wordt bij deze optie opgeslagen in een "metaalspons". De waterstof lost in de praktijk op bij een lage temperatuur en komt weer vrij bij een hogere temperatuur. De vorming van metaalhydrides is exotherm dus tijdens vullen zal de massa gekoeld, en tijdens gebruik opgewarmd, moeten worden. Dit voegt ook weer massa toe aan het complete systeem. Ook de dichtheid van de metaalstapeling mag niet te hoog worden omdat het waterstof ook in en uit de bulk moeten kunnen diffunderen. Metaalhydrides zijn erg zwaar en duur, waterstofopslag op gewichtsbasis komt niet boven de 1 à 2 %. Op volume basis zijn ze echter zeer competitief en soms zelfs vergelijkbaar of beter dan vloeibare waterstof.

Wanneer verschillende metalen gemengd worden kan de werkdruk, waarbij de waterstof vrij komt, gevarieerd worden tussen 0,4 en 25 bar (bij 25 °C).

Irreversibele metaalhydride, waterstof ontsluiting door reactie met water

De irreversibele metaalhydrides bevatten vaak lichtere metalen dan de reversibele hydrides. Hierdoor is de waterstofinhoud per gewichtseenheid groter. Hierbij dient aangetekend te worden dat in het algemeen ook het voor de waterstof vorming benodigde water meegenomen dient te worden.



In het geval dat deze manier van waterstofopslag gecombineerd wordt met een brandstofcel zou het mogelijk moeten zijn om de mee te nemen hoeveelheid water drastische te reduceren. De brandstofcel produceert zelf namelijk water bij de reactie van waterstof met zuurstof uit de lucht.

Bijlage C: Minimale massa voor verschillende energiesystemen

Energiebron	Specifieke Energie [Wh/kg]	Massa [kg]	Spanning** [Volt]
Zn / MnO ₂	125	3,2	1,0
Mg / MnO ₂	100	4,0	2,0
Zn / HgO	100	4,0	1,3
Zn / Ag ₂ O	120	2,9 - 3,3	1,5
Zn / AgO	140		
Zn / O ₂ (lucht)	215-500	0,8 - 1,9	1,3
Al / O ₂ (lucht)	300	1,3	1,3
Li / SO ₂	250	1,6	2,8
Li / SOCl ₂	320*	1,3	3,4
Li / SO ₂ Cl ₂	450*	0,9	3,8
Li / MnO ₂	230	1,7	3,2
Li / (CF) _x	250	1,6	2,5
Li / FeS ₂	130	3,2	1,5
Pb / PbSO ₄	35-50	8,0 - 11,4	2,0
Ni / Cd	35-50	8,0 - 11,4	1,2
Ni / MH	50-100	4,0 - 8,0	1,3
Li-ion	140-160	2,5 - 2,9	3,5
Li-polymeer	150-200	2,0 - 2,7	3,5
Condensator	5-10	40 - 80	variabel
Vliegwiel	5-10	40 - 80	variabel
Brandstofcel	‡	--	0,5 - 1,0
Microturbine	‡	--	variabel

* Deze waarden zijn hoog en momenteel nog niet in produktietypen haalbaar.

** De opgegeven spanning is voor één cel, in volgeladen toestand. Hogere spanningen zijn realiseerbaar door serieschakelingen.

‡ De specifieke energie van deze systemen wordt bepaald door de specifieke energie van de brandstof voorraad, zie tabel 3.

Bijlage D: Voorstel voor eerste testserie van mogelijke energiebronnen

Ter vergelijking:

Het Amerikaanse leger hanteert een minimum continu vermogen van 25 W en een maximum continu vermogen van 40 W. Een standaard test bestaat uit een opeenvolgende vermogensvraag van negen minuten 25 W gevolgd door één minuut 40 W. De prestaties van de energiebron indien het maximum vermogen gedurende langere tijd gevraagd wordt is onbekend.

D.1 Energie- en vermogenstest

Om te testen of de energiebron in staat is om de gewenste energie en minimum- en maximum- vermogens output te leveren kan in eerste instantie een fictief vermogensprofiel worden opgesteld. Dit profiel zal voldoen aan de globale specificaties zoals vermeld in hoofdstuk 3 in dit rapport.

Dit betekent voor het totale systeem, voor 24 uur, een energie-inhoud van 400 Wh en een maximaal te leveren vermogen van 35 W. De perioden van minimaal en maximaal vermogen zullen op een met de Amerikaanse manier vergelijkbaar profiel getest worden. Dit betekent een vaste periode maximaal en een vaste periode minimaal vermogen. Omdat het maximale vermogen vast ligt en de totaal te leveren energie ook, volgt hieruit het minimaal te leveren vermogen van 15 W. Het testprofiel voor een totaal systeem zal dus bestaan uit een zich gedurende 24 uur herhalend profiel van 1 minuut 35 W en 9 minuten 15 W. Tevens kan gedurende een 24-uurs profiel gekeken worden hoelang het maximale vermogen geleverd kan worden na bepaalde tijdsperioden. Bijvoorbeeld kan een testprofiel één of meerdere dubbele, of driedubbele, periode laagvermogen gevolgd door een dubbele, of driedubbele, periode hoog vermogen bevatten. Vergelijk met profiel 2 en profiel 3 voor de primaire batterij.

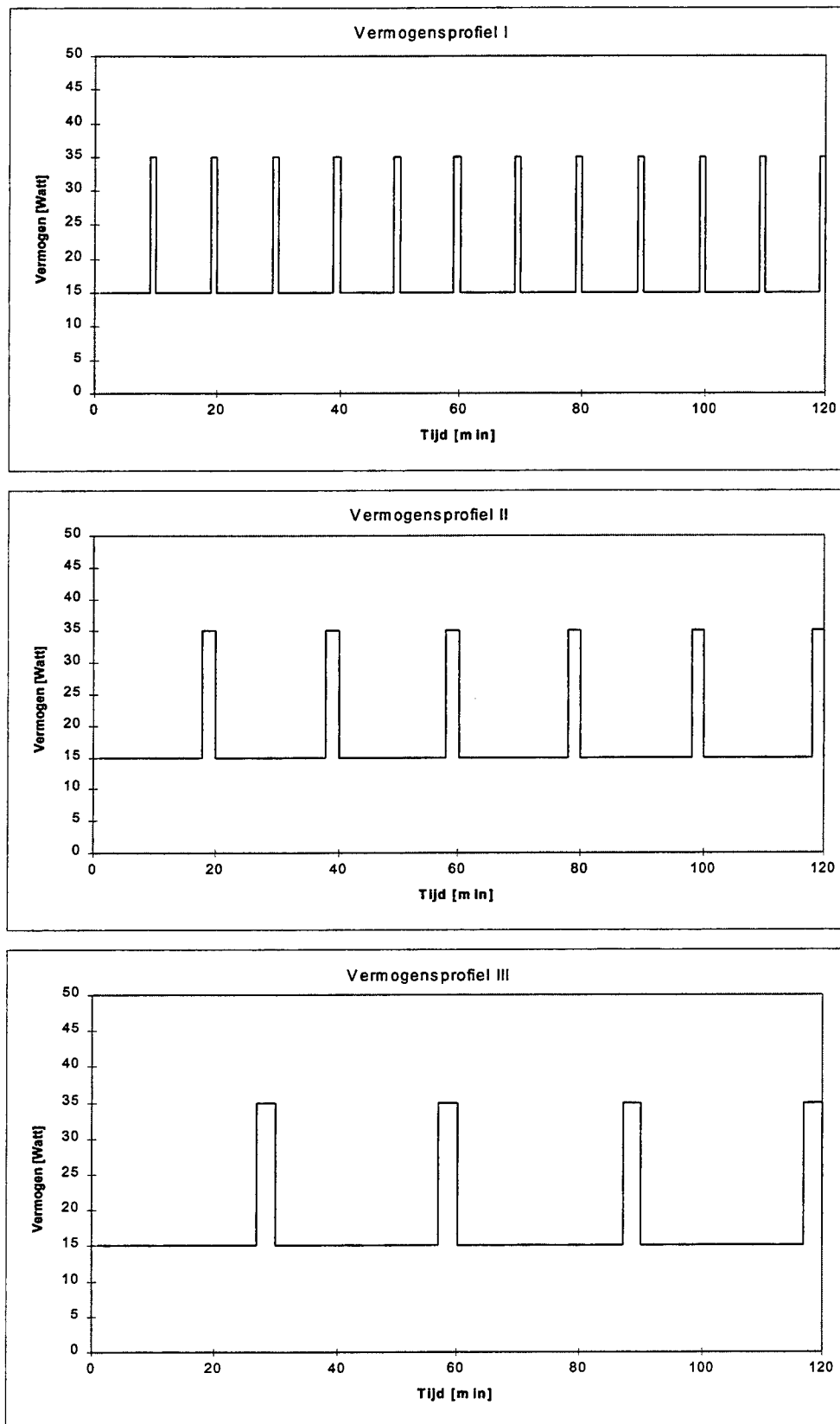
Voor de feitelijke testen zullen batterijen met een kleinere energie-inhoud worden gebruikt. Hiervoor zal het profiel naar ratio worden terug geschaald.

Voor de secundaire batterijen zal elke 24-uurs cyclus gevolgd worden door een laadclus waarna de 24-uurs ontlaadcyclustijd weer begint.

Van de primaire batterijen zal een pakket volgens profiel I getest worden, een tweede, en eventueel nog meerdere zal met een combinatie van de verschillende profielen belast worden. De secundaire batterijen zullen tijdens de testperiode met verschillende 24-uurs profielen worden belast. Deze zullen bestaan uit combinaties van de drie voorbeeldprofielen.

De bovenstaande testen zullen uitgevoerd worden bij kamertemperatuur.

Figuur D1,2,3 Globale testprofielen die gedurende 24-uur continu worden opgelegd aan de batterijen.



D.2 Start-up tijd en Respons tijd test

Om de gevolgen van een verandering in vermogensvraag op de energiebron te testen kan er een test worden uitgevoerd waarbij de vermogensvraag aan de energiebron gevarieerd wordt.

Bij deze test kan de energiebron belast worden volgens een profiel dat minstens de volgende veranderingen in vermogensvraag zal bevatten:

- van nul naar maximaal vermogen
- van maximaal vermogen naar nul
- van minimaal naar maximaal vermogen
- van maximaal naar minimaal vermogen

De tijdsspanne waarin deze veranderingen zullen worden uitgevoerd moet nog nader bepaald worden.

D.3 Lage Temperatuur Testen

Om te controleren of de geselecteerde batterijen nog steeds aan de gewenste energie- en vermogens vraag kunnen voldoen bij lagere temperaturen zullen de energie- en vermogenstesten ook bij verlaagde temperatuur worden uitgevoerd.

Voorlopig zijn 0°C en -25°C als condities gekozen. Waarbij -25°C als ondergrens voor functioneren wordt aangehouden.

REPORT DOCUMENTATION PAGE

(MOD-NL)

1. DEFENCE REPORT NO (MOD-NL) 99-0437	2. RECIPIENT'S ACCESSION NO	3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NO R 99/490
4. PROJECT/TASK/WORK UNIT NO 30255	5. CONTRACT NO A99/KL/158	6. REPORT DATE December 1999
7. NUMBER OF PAGES 51 (incl. 4 appendices, excl. RDP & distribution list)	8. NUMBER OF REFERENCES	9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED Interim, May 1999 - December 1999
10. TITLE AND SUBTITLE Energy sources for Soldier Modernisation Programme Systems (Overzicht van ontwikkelingen op het gebied van draagbare energieopslag en energieopwekking)		
11. AUTHOR(S) J.W. Raadschelders, D. Schmal		
12. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES) TNO institute of Environmental Sciences, Energy Research and Process Innovation P.O. Box 342, 7300 AH Apeldoorn, The Netherlands		
13. SPONSORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES) TNO Defence Research P.O. Box 6006, 2600 JA Delft, The Netherlands		
14. SUPPLEMENTARY NOTES The classification designation Ongerubriceerd is equivalent to Unclassified		
15. ABSTRACT (MAXIMUM 200 WORDS (1044 BYTE)) <p>In this report an overview is given of the energy sources and their properties which might be implemented in a future soldier system. In chapter 3 the general specifications for the energy source are given. They are based on data from the Royal Netherlands Army and the US Army. From these data it results that a potential energy source has to be able to generate a minimum of 10 W and a maximum of 35 W and to deliver a total of 400 Wh in 24 hours. Little is yet known about the energy consumption of the systems currently under development at the TNO-Defence research institutes. It is clear that the energy consumption of a future system so far has not been a major point of consideration.</p> <p>In chapter 4 a global overview is given of the possible energy sources which might be applied in the future soldier systems. A subdivision has been made between four different energy sources:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Systems which store electrical energy. 2. Systems which convert fuel into electrical energy. 3. Human powered systems. 4. Systems powered by external forces. <p>For these four the specific properties, advantages and disadvantages are treated of the available systems. Also the systems which are currently under development and expected to become available in reasonable time are mentioned. An overview of the developments for soldier modernisation in the United States, referred to as "The dismounted soldier" is given in Annex A.</p> <p>In chapter 5 a first selection of energy sources which might be applied in the future soldier systems, based on the general specifications given in chapter 3, has been made. A subdivision has been made between the short term and long term options. Long term options are expected to become available for large scale consumption only after more than 5 years from now.</p> <p>From this first selection it has turned out that, for the short term batteries are the most viable option. For the non-rechargeable batteries, the Li / SOCl₂ type and for the rechargeable types, the Li-ion and the NiMH batteries are the most attractive types. For the long term application the Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) is currently considered to be the best option for energy generation.</p>		
16. DESCRIPTORS		IDENTIFIERS
Energy storage batteries fuel cells	combustion engines capacitors turbines	flywheels electricity future soldier
17a. SECURITY CLASSIFICATION (OF REPORT) -	17b. SECURITY CLASSIFICATION (OF PAGE) -	17c. SECURITY CLASSIFICATION (OF ABSTRACT) -
18. DISTRIBUTION AVAILABILITY STATEMENT Unlimited availability		17d. SECURITY CLASSIFICATION (OF TITLES) -

Distributielijst

1 / 2	DWOO	
3	HWO-KL	
4	HWO Klu	
5	HWO-KM	
6	LAS/DB&P/BO/OB&T	t.a.v. lkol Meijer
7	LAS/DB&P/BO/OB&T	t.a.v. aooi Jansen
8	LAS/DB&P/BO/OB	
9	LAS/DB&P/BO/CIV	
10	OCMAN/Externe plannen Infanterie	
11	DM/C3I	
12	DM/COM	
13	KPU-bedrijf	
14	DOPKLu/AGW/GRO	
15	Kmarns/BLZ	t.a.v. KaptMarns Doolaard
16	Marstaf/SOMARNS	
17	DM&P TNO-DO	
18	DM&P TNO-DO	t.a.v. Accountcoordinator KL
19	Bureau TNO Defensieonderzoek	
20 / 21	Bibliotheek KMA	
22	Programmaleider SMP TNO	t.a.v. Mathijs Leeuw (TNO-PML)
23	Programmaleider SMP TNO	t.a.v. Wouter Lotens (TNO-TM)
24	Directeur TNO-FEL	
25	Directeur TNO-PML	
26	Directeur TNO-TM	